

Sistema robotizado de extração de peças e lubrificação de moldes de injeção

BERNARDO QUIRINO PEDROSA

julho de 2019

SISTEMA ROBOTIZADO DE EXTRAÇÃO DE PEÇAS E LUBRIFICAÇÃO DE MOLDES DE INJEÇÃO

Bernardo Quirino Pedrosa



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2019

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Bernardo Quirino Pedrosa, N° 1141220, 1141220@isep.ipp.pt

Orientação científica: Manuel Fernando dos Santos Silva, mss@isep.ipp.pt

Empresa: RobotSol - Engenharia Industrial, S.A.

Supervisão: Mário Miguel Cardoso Tavares Silva Martins, mario.martins@robotsol.com



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

3 de julho de 2019

*“The only moment of possible happiness is the present. The past gives regrets. And the
future uncertainties. Man quickly realised this and created religion.
It absolves you of what you’ve done wrong in the past and tells him not to worry about
the future, because he’ll go to paradise.”*

Arsène Wenger

Agradecimentos

Agradeço a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização desta dissertação de mestrado.

Gostaria de agradecer ao Professor Doutor Manuel Silva, meu orientador, por ter acreditado em mim e nas minhas capacidades. Agradeço a forma como abordava as nossas reuniões de trabalho, o que permitiu um maior envolvimento no trabalho, mesmo quando a situação se complicou.

Agradeço, também, ao Eng.º Mário Martins, meu orientador na empresa, pela oportunidade de conhecer o meio laboral e pelo apoio prestado no desenvolvimento do projeto. Aos colaboradores da empresa pelo apoio proporcionado neste período.

Aos meus amigos e colegas, Luís Almeida, Miguel Mira e Vitor Sousa, que realizaram a dissertação na mesma Empresa, a RobotSol, pelos bons momentos e pela entreaajuda, que facilitaram bastante o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço de forma especial, à Alexandra, por estar sempre do meu lado, pela paciência, tolerância e apoio durante a elaboração da presente dissertação.

Por último, agradeço à minha família, aos meus pais e aos meus irmãos, o apoio incondicional e incentivo prestado em todo o meu percurso académico, que o tornou melhor, e que forneceu ferramentas e capacidades para ultrapassar obstáculos que foram surgindo ao longo deste caminho.

Resumo

A introdução de robótica em certos postos de trabalho apresenta não só uma melhoria nas condições de trabalho dos operadores, mas também um aumento na eficiência da indústria onde é aplicada. Um exemplo de indústria onde a robótica tem esta influência é a fundição. Os operadores deste tipo de indústria estão sujeitos a ambientes muito agressivos que põem em causa a sua saúde, sendo que são, também, trabalhos muito repetitivos, podendo causar diversas lesões.

Este projeto baseia-se no desenvolvimento de sete células robotizadas que têm como objetivo a implementação das melhorias referidas no parágrafo anterior. Estas células utilizam dois manipuladores industriais de seis eixos, da empresa de robótica Asea Brown Boveri (ABB), utilizados para realizar a extração de peças de alumínio de uma máquina injetora, e, de seguida, a lubrificação da mesma.

De modo a obter-se o nível de conhecimento necessário à implementação deste projeto, realizaram-se pesquisas relacionadas com robótica industrial e todos os componentes essenciais ao desenvolvimento de uma célula robotizada, efetuou-se um estudo relacionado com programação de robôs e foi realizada, também, uma pesquisa relativa à robótica na indústria da fundição.

Após as pesquisas efetuou-se a implementação das sete células robotizadas. Desenvolveu-se, primeiro, a simulação, com a utilização do ABB RobotStudio, validando-se todos os componentes. De seguida, efetuou-se o desenvolvimento do código dos 14 robôs e demonstrou-se a sua utilização na célula real. Os resultados pretendidos com a realização deste projeto foram alcançados.

A realização deste trabalho permitiu a obtenção de conhecimentos relativos à robótica industrial, programação de robôs e a sua interação com os diversos dispositivos de uma célula robotizada, assim como os benefícios que a automatização de processos traz às indústrias.

Palavras-chave: Robótica Industrial, Indústria da Fundição, ABB, ABB RobotStudio, Automação.

Abstract

The introduction of robotics in certain jobs presents not only an improvement in the work conditions of the operators, but also an increase in the efficiency of the industry where this introduction occurs. An example of industry where robotics has this influence is the foundry. The operators who work in this type of industry are subject to very aggressive environments which put their health in question, in addition, this type of work is very repetitive, which can cause various injuries.

This project is based on the development of seven robotic solutions that have as objective the implementation of the improvements referred in the previous paragraph. These solutions are composed by two six-axis industrial manipulators from the robotics company Asea Brown Boveri (ABB), used to carry out the extraction of aluminium parts from a injection machine, and then lubricating it.

In order to obtain the level of knowledge necessary to implement this project, researches about the following subjects were made: industrial robotics; all the necessary components in a robotic cell; robot programming and robotics in the foundry industry.

After the research, the implementation of the seven robotic cells began. Firstly, the offline simulation was developed, using ABB RobotStudio, with all components being validated. Finally, the development of the code for the 14 industrial robots and its use in the real cell was shown. The intended results with the implementation of this project were fulfilled.

The implementation of this project allowed the obtaining of knowledge related to industrial robotics, robot programming and its interaction with the several devices that make up a robotized cell, as well as the benefits process automation brings to industries.

Keywords: Industrial Robotics, Foundry Industry, ABB, ABB RobotStudio, Automation.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	2
1.2	Objetivos	2
1.3	Calendarização	3
1.4	Organização do relatório	5
2	Robótica industrial	7
2.1	Conceitos de robótica	7
2.1.1	As três Leis de Asimov	8
2.1.2	Robô industrial	8
2.1.3	Segurança	8
2.2	Características de desempenho de um robô industrial	10
2.2.1	Capacidade de carga	10
2.2.2	Exatidão	10
2.2.3	Repetibilidade	10
2.2.4	Resolução	11
2.2.5	Velocidade	11
2.2.6	Aceleração	11
2.2.7	Tempo de vida dos componentes e tempo de ciclo	12
2.3	Cinemática de um robô industrial	12
2.3.1	Graus de liberdade	12
2.3.2	Juntas	13
2.3.3	Cinemática	14
2.3.4	Singularidades	15
2.3.5	Volume de trabalho	15
2.3.6	Sistemas de controlo de movimento	16
2.4	Tipos de robôs	16
2.5	Célula de robótica	18
2.5.1	Manipulador	18
2.5.2	Controlador	18
2.5.3	Atuadores finais	19

2.5.4	Sensores	20
2.5.5	Atuadores	22
2.5.6	Dispositivos de segurança	23
2.5.7	Controlador Lógico Programável	24
2.5.8	Interligação dos componentes	24
2.6	Conclusão do capítulo	25
3	Programação de robôs industriais	27
3.1	Métodos de programação de robôs	27
3.1.1	Programação <i>offline</i>	27
3.1.2	Programação <i>online</i>	30
3.1.3	Comparação entre ambos os métodos de programação descritos	31
3.2	<i>Software</i> de programação <i>offline</i> da ABB	31
3.2.1	Machine Tending PowerPac	32
3.2.2	Linguagem de programação RAPID	33
3.3	Redes de comunicação industrial	33
3.3.1	PROFIBUS	34
3.3.2	Ethernet	35
3.4	Conclusão do capítulo	36
4	Robótica na indústria da fundição	39
4.1	Aplicações de manuseamento de materiais	39
4.2	Fundição na robótica	40
4.2.1	Sequência do processo de formação da peça	41
4.2.2	Funcionamento da célula com o robô	42
4.2.3	Segurança na indústria da fundição	43
4.3	Indústria automóvel	44
4.3.1	Alumínio na indústria automóvel	44
4.4	Casos de Estudo	46
4.4.1	Aplicação geral de robótica para <i>machine tending</i>	46
4.4.2	Solução de robótica na fundição utilizando robôs da ABB	53
4.4.3	Implementação de robótica na empresa sueca Ljunghäll AB	54
4.4.4	Aumento da produtividade e condições de trabalho com robotização	56
4.4.5	Solução robotizada com robôs ABB na empresa Pressmetall	57
4.4.6	Nova célula de fundição com robôs KUKA	58
4.5	Conclusão do capítulo	60
5	Desenvolvimento do modelo de simulação	61
5.1	Descrição do problema	61
5.2	Descrição do processo	62
5.3	<i>Layout</i> das células implementadas	63

5.3.1	Máquina injetora e prensa	64
5.3.2	Molde centrado e descentrado	65
5.3.3	Matriz de sensores	66
5.3.4	Tina de água	67
5.3.5	Rampas	68
5.3.6	Pedestais	68
5.3.7	Redes de segurança	69
5.3.8	<i>Layout</i> a duas dimensões	69
5.4	Manipuladores robóticos	70
5.4.1	Atuadores finais	72
5.5	Desenvolvimento das trajetórias dos robôs	79
5.5.1	Tipos de movimentos	79
5.5.2	Robô extrator	79
5.5.3	Robô lubrificador	85
5.6	Conclusão do capítulo	85
6	Desenvolvimento do código e implementação das células	87
6.1	Arquitetura do sistema	87
6.2	Desenvolvimento do código dos robôs	88
6.2.1	Porta de entrada da célula	88
6.2.2	Robô extrator	89
6.2.3	Robô lubrificador	95
6.2.4	Configuração dos <i>targets</i> criados	99
6.3	Implementação no cliente	100
6.3.1	Interação entre robôs e operadores	102
6.4	Testes realizados	103
6.5	Tempos de ciclo	105
6.5.1	Tempo de ciclo na simulação	105
6.5.2	Tempo de ciclo real	106
6.5.3	Comparação de resultados	107
6.6	Conclusão do capítulo	107
7	Conclusão	109
7.1	Trabalho Futuro	111
	Referências	113
A	Consolas de programação	119
A.1	Consola de programação da KUKA	119
A.2	Consola de programação da ABB	120
A.3	Consola de programação da FANUC	121

B Características de desempenho dos robôs **123**

C *Targets* definidos na trajetória desenvolvida para o molde centrado da Célula C **125**

C.1	Posição inicial - Máquina injetora	125
C.2	Máquina injetora - Matriz de sensores	125
C.3	Matriz de sensores - Tina de água	126
C.4	Tina de água - Prensa - Posição inicial	126
C.5	Tina de água - Rampa de inspeção - Posição inicial	126
C.6	Tina de água - Rampa NOK - Posição inicial	127
C.7	Robô lubrificador	127

D Sinais digitais **129**

D.1	Sinais de entrada digitais enviados pela máquina injetora para R1	129
D.2	Sinais de saída digitais enviados por R1 para a máquina injetora	130
D.3	Sinais de entrada digitais de R1	130
D.4	Sinais de saída digitais de R1	130
D.5	Sinais de entrada digitais enviados pela máquina injetora para R2	131
D.6	Sinais de saída digitais enviados por R2 para a máquina injetora	131
D.7	Sinais de entrada digitais de R2	132
D.8	Sinais de saída digitais de R2	132

Lista de Figuras

1.1	Evolução da quantidade de robôs industriais (IFR, 2018b).	1
1.2	Calendarização do projeto desenvolvido.	4
2.1	Representação das características repetibilidade (RP) e exatidão (AP) (ABB, d).	11
2.2	Manipulador IRB 4600 da ABB (ABB, d).	13
2.3	Relação entre cinemática direta e inversa (Laloni and Wahl, 1995). 14	
2.4	Volume de trabalho do robô KR 16 S da KUKA (KUKA).	16
2.5	Manipulador R-1000iA/100F da FANUC (FANUC, b).	18
2.6	Controlador IRC5, com o FlexPendant, da ABB (ABB, b).	19
2.7	Garra mecânica da empresa SCHUNK (SCHUNK).	20
2.8	Sistema de sensor sem contacto (Kretschmar and Welsby, 2005).	21
2.9	Exemplo de botões de emergência da empresa ABB (ABB, 2018).	23
2.10	PLC da série NX7 da empresa Omron (Omron, 2019).	24
2.11	Arquitetura de um robô (Lopes, 2001).	25
3.1	Exemplo de aplicação no <i>software</i> ABB RobotStudio (ABB, f).	28
3.2	Pirâmide das redes de comunicação na automação (Sauter, 2014).	34
4.1	Máquina injetora de fundição com pratos duplos (Heinemann, 2016).	41
4.2	Processo de formação da peça na máquina injetora (Heinemann, 2016).	42
4.3	Célula de robótica na fundição (Heinemann, 2016).	43
4.4	Peças de alumínio num automóvel (CFS, 2017).	45
4.5	Arquitetura da aplicação (Li and Huang, 2008).	46
4.6	Estrutura da aplicação do controlador e <i>Teach Pendant</i> (Li and Huang, 2008).	47
4.7	Estrutura da aplicação do controlador (Li and Huang, 2008).	49
4.8	Solução proposta realizada no ABB RobotStudio (ABB, 2015b).	54
4.9	Célula de robótica em funcionamento na Ljunghäll AB (ABB, 2007a).	55
4.10	Robô lubrificador da ABB utilizado na VDT Vobra (ABB, 2007b).	56
4.11	Célula de robótica implementada na Auto Heinen (KUKA, 2016).	59
4.12	Colocação da peça para prensagem (KUKA, 2016).	60

5.1	Fluxograma geral do processo do robô extrator.	63
5.2	Posicionamento das máquinas na Célula C.	64
5.3	Desenho técnico da prensa da Célula C.	65
5.4	Desenho técnico da máquina injetora de 750 t.	66
5.5	Posições da matriz de sensores na Célula C.	67
5.6	Folha informativa das tinas de água fornecida pelo cliente.	68
5.7	<i>Layout</i> a duas dimensões da Célula C.	70
5.8	Célula C com todos os seus componentes: 1. robô lubrificador com o seu pedestal; 2. máquina injetora; 3. matriz de sensores; 4. rede de segurança; 5. tina de água; 6. robô extrator com o seu pedestal; 7. prensa; 8. rampa de inspeção; 9. rampa NOK; 10. porta de segurança; 11. controladores dos robôs.	71
5.9	Diagrama de carga do robô para o IRB 4600 utilizado (ABB, d).	73
5.10	Desenvolvimento da garra do robô extrator.	73
5.11	Posições do <i>gripper</i> do robô extrator da Célula C.	74
5.12	Resultados do teste do <i>gripper</i> do R1 no RobotLoad.	75
5.13	Diagrama de carga do robô para o IRB 2600 utilizado (ABB, c).	76
5.14	<i>Gripper</i> do robô lubrificador da Célula C.	77
5.15	Resultados do teste do <i>gripper</i> do R2 no RobotLoad.	78
5.16	Abertura dos pratos da máquina com o molde de tipo centrado.	80
5.17	Trajetória, até à tina de água, do robô extrator da Célula C.	82
5.18	Trajetória, para a prensa, do robô extrator da Célula C.	83
5.19	Trajetória, para a rampa de inspeção, do robô extrator da Célula C.	84
5.20	Trajetória, para a rampa NOK, do robô extrator da Célula C.	84
5.21	Trajetória para limpeza do molde centrado da Célula C.	85
6.1	Arquitetura do sistema.	88
6.2	Botões de emergência das células.	89
6.3	Início do programa principal do R1.	90
6.4	Segunda parte do fluxograma principal do R1.	91
6.5	Terceira parte do fluxograma principal do R1.	92
6.6	Quarta parte do fluxograma principal do R1.	93
6.7	Quinta parte do programa principal do R1.	93
6.8	Sexta parte do programa principal do R1.	94
6.9	Sétima parte do programa principal do R1.	95
6.10	Primeira parte do fluxograma do R2.	96
6.11	Segunda parte do fluxograma do R2.	97
6.12	Terceira parte do fluxograma do R2.	98
6.13	Quarta parte do fluxograma do R2.	98
6.14	Quinta parte do fluxograma do R2.	99

6.15	Posição inicial do robô extrator.	101
6.16	Posições do robô lubrificador na Célula C.	101
6.17	Componentes da porta de entrada na Célula C.	102
6.18	Periféricos da Célula C.	103
6.19	Eletroválvulas para o R2 da Célula C.	104
6.20	<i>Gripper</i> de R2 montado.	104
6.21	Diagrama de tempo do processo dos robôs da Célula C, para molde descen- trado.	106
A.1	Consola de programação da KUKA (KUKA, 2018).	120
A.2	Consola de programação da ABB (ABB, a).	121
A.3	Consola de programação da FANUC (FANUC, a).	122

Lista de Tabelas

2.1	Estruturas mecânicas de robôs industriais (Hägele et al., 2016).	17
3.1	Características do PowerPac de <i>machine tending</i> (ABB, 2012).	32
3.2	Comparação das características de PROFINET e PROFIBUS (Pigan and Metter, 2008).	36
5.1	Equipamento utilizado nas células robotizadas a implementar.	62
5.2	Medidas das tinas de água.	67
5.3	Pedestais utilizados nas células.	69
5.4	Resumo das distâncias a atingir por R1 na Célula C.	69
5.5	Robôs utilizados nas células.	72
5.6	Dimensões dos <i>grippers</i> dos robôs extratores até ao TCP.	74
5.7	Dimensões dos atuadores finais dos robôs lubrificadores até ao TCP.	78
5.8	Distâncias entre os pratos e os moldes nas células.	80
6.1	Tempo de ciclo do R1 na Célula C com molde descentrado.	105
B.1	Características de desempenho dos robôs (ABB, d,e,c).	123
C.1	<i>Targets</i> definidos da posição inicial à máquina injetora.	125
C.2	<i>Targets</i> definidos da máquina injetora à matriz de sensores.	125
C.3	<i>Targets</i> definidos da matriz de sensores à tina de água.	126
C.4	<i>Targets</i> definidos da tina de água à prensa.	126
C.5	<i>Targets</i> definidos da tina de água à rampa de inspeção.	126
C.6	<i>Targets</i> definidos da tina de água à rampa NOK.	127
C.7	<i>Targets</i> definidos para lubrificação.	127
D.1	Sinais de entrada da máquina injetora para R1.	129
D.2	Sinais de saída de R1 para a máquina injetora.	130
D.3	Sinais de entrada de R1.	130
D.4	Sinais de saída de R1.	130
D.5	Sinais de entrada da máquina injetora para R2.	131
D.6	Sinais de saída enviados de R2 para a máquina injetora.	131
D.7	Sinais de entrada de R2.	132

D.8 Sinais de saída de R2.	132
------------------------------------	-----

Acrónimos

ABB	Asea Brown Boveri
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAFE	<i>Corporate Average Fuel Economy</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CoG	<i>Center of Gravity</i>
CP	<i>Continuous Path</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DOF	<i>Degrees Of Freedom</i>
E/S	Entradas e Saídas
EUA	Estados Unidos da América
FAN	<i>Field Area Network</i>
FANUC	Fuji Automatic NUmerial Control
FMS	<i>Flexible Manufacturing System</i>
GAN	<i>Global Area Network</i>

GSD	<i>General Station Description</i>
HMI	<i>Human-Machine Interface</i>
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>
IFR	International Federation of Robots
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
KUKA	Keller Und Knappich Augsburg
LAN	<i>Local Area Network</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
NOK	<i>Not OKay</i>
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PTP	<i>Point-To-Point</i>
RAM	<i>Random-Access Memory</i>
SCARA	<i>Selective Compliance Articulated Robot Arm</i>
SMB	<i>Serial Measurement Board</i>
STEP	<i>STandard for the Exchange of Product model data</i>
TCP	<i>Tool Center Point</i>

USB *Universal Serial Bus*

WAN *Wide Area Network*

XML *eXtensible Markup Language*

Capítulo 1

Introdução

Um estudo realizado em finais de 2017 prevê que cerca de 800 milhões de empregos poderão ser substituídos por processos automatizados até 2030. Apesar de, à primeira vista, não aparentar ser uma realidade favorável, este panorama traz muitos aspetos positivos: criará novos postos de trabalho; as pessoas que ficarem sem emprego terão, possivelmente, um salário fixo, devido à sua substituição por robôs; as empresas tornar-se-ão mais eficientes e com lucros mais elevados ([Vincent, 2017](#)).

A tecnologia torna certos postos de trabalho desnecessários, mas, em contrapartida, cria novos. Pode-se usar, como exemplo, a introdução do computador que, desde a década de 80, gerou milhões de postos de trabalho, tendo já em consideração todos os que fez desaparecer.

Em junho de 2018, a International Federation of Robotics (IFR) revelou que as vendas globais de robôs industriais atingiram um novo recorde de 387 000 unidades em 2017, o que significa um aumento de 31% em relação ao ano anterior (em 2016 venderam-se 294 300 unidades). O país onde se observa um maior crescimento é a China, que aumentou a procura em 58%. Nos Estados Unidos da América houve um crescimento de 6%, sendo que na Alemanha subiu 8% ([IFR, 2018a](#)). A Figura 1.1 apresenta a evolução, ao longo dos anos, das vendas relativas a robôs industriais.

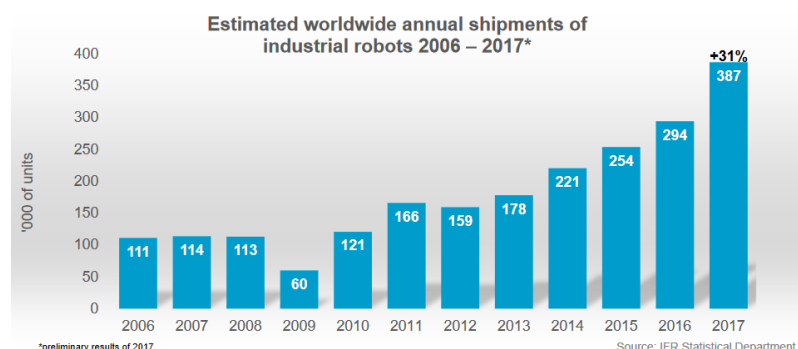


Figura 1.1: Evolução da quantidade de robôs industriais ([IFR, 2018b](#)).

Com o constante avanço da tecnologia, os algoritmos de controlo de robôs serão simplificados, o que irá permitir a pequenas e médias empresas uma introdução mais fácil ao mundo da robótica, uma vez que não haverá necessidade de contratar pessoas especializadas. Assim, no futuro, a procura e as vendas de robôs vão aumentar.

1.1 Contextualização

A indústria da fundição apresenta um risco elevado de acidentes, sendo que quem trabalha nesta área está, também, em constante contacto com químicos e substâncias tóxicas. Uma fábrica que produza peças de alumínio apresenta uma atmosfera perigosa para a saúde de qualquer ser vivo: muito pó, temperaturas elevadas, fumos e barulho. Este ambiente pode causar intoxicações, perda de audição, problemas cardíacos, cancro e problemas nos pulmões. Se existirem atividades que envolvam pulverização existe um contacto elevado com solventes. Os trabalhadores estão, também, suscetíveis a problemas musculoesqueléticos devido à exigência física das tarefas que têm de desempenhar. Para além disto, os postos de trabalho onde se pretende implementar as soluções de robótica apresentadas nesta dissertação possuem tarefas muito repetitivas ([Hoffmann, 2017](#)).

A introdução da robótica aumenta a eficiência desta indústria, visto que os robôs conseguem completar certas tarefas mais rápido e com mais precisão do que as pessoas. Com este aumento de precisão, perde-se menos tempo no controlo de qualidade. No caso de tarefas repetitivas e perigosas, a introdução de robôs é fundamental, dado que estes não se cansam, não sofrem lesões, nem cometem erros que podem ser fatais. Com isto, torna-se perceptível que há um aumento da segurança da fábrica. Com a automação dos processos consegue-se, também, aumentar o número de horas de funcionamento dos postos de trabalho, produzindo-se mais nesse espaço de tempo, visto que o robô não necessita de pausas ([Gantra, 2016](#)).

Fazendo-se uma análise dos prós e contras relativos a este tipo de indústria, depreende-se que é fulcral a existência da automação de processos com a implementação de células de robótica, pois irá permitir haver melhorias em vários aspetos, tais como a saúde dos trabalhadores e o aumento da eficiência da produção.

1.2 Objetivos

Este projeto tem como objetivo a implementação de sete células robotizadas, utilizando-se, em cada uma, dois robôs da empresa ABB. A função destas células é formar peças de alumínio, sendo que os robôs a implementar realizam a extração dessas peças, formadas numa máquina injetora (*master* da célula), fazendo, de seguida, a lubrificação e limpeza dos moldes dessa máquina. O primeiro robô é responsável pela remoção da peça e o segundo pela lubrificação e limpeza.

Inicialmente, é necessário realizar-se o levantamento de todo o material necessário ao correto funcionamento de cada célula. Depois, coloca-se este material no *software* de simulação da ABB, o RobotStudio. Após isto, começa-se por modelar uma cópia de cada célula, para se ajustar e, se necessário, alterar o material escolhido (pedestais, matrizes de sensores, redes de segurança e rampas de saída de peças). A adicionar a estes componentes, são também escolhidos os manipuladores robóticos, juntamente com os seus atuadores finais, a integrar cada uma das sete células.

Após a escolha de todos os componentes, realiza-se a programação das trajetórias do robô extrator e lubrificador. Depois, efetua-se a programação da lógica de ambos os manipuladores robóticos, necessária para existir um correto funcionamento das células, utilizando-se a linguagem de programação da ABB para desenvolvimento de código, o RAPID.

Por fim, já no cliente, realiza-se a programação *online* de cada célula, fazendo-se os aperfeiçoamentos necessários às trajetórias e ao código desenvolvido, de modo a que se obtenha o funcionamento pretendido. É necessário, também, utilizar-se uma rede de comunicação industrial para se configurar as ligações entre componentes da célula (robôs, máquina injetora e prensa).

1.3 Calendarização

Nesta secção é apresentada, na Figura 1.2, a calendarização do projeto desenvolvido nesta dissertação. O estudo teórico efetuado, necessário para a obtenção de conhecimento relativo ao assunto do projeto, encontra-se representado pela cor verde. A implementação do projeto encontra-se representada pela cor azul.

Como se pode observar, o projeto teve uma duração de, aproximadamente, nove meses. Inicialmente, foi efetuado um estudo teórico, necessário ao desenvolvimento do projeto, mas este só foi escrito após a conclusão da implementação. A duração do estudo inicial, seguido do desenvolvimento das soluções, teve uma duração de quatro meses. A escrita da dissertação foi realizada em cinco meses.

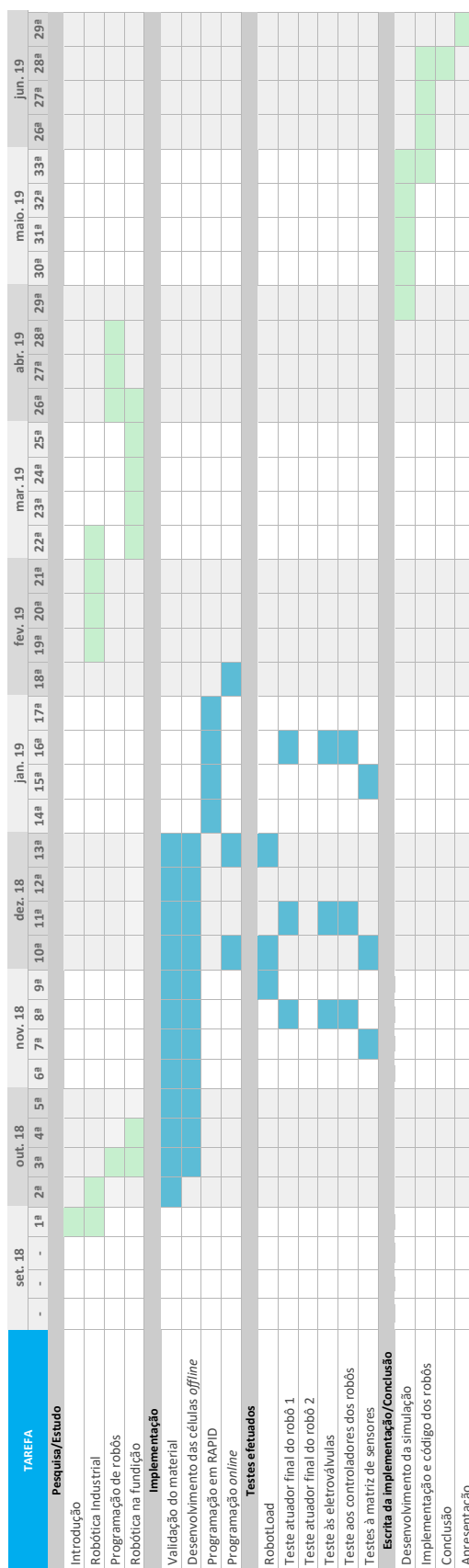


Figura 1.2: Calendarização do projeto desenvolvido.

1.4 Organização do relatório

Este relatório encontra-se dividido em diversos capítulos, de modo a possibilitar ao leitor uma melhor compreensão dos assuntos abordados.

Assim, no Capítulo 1 descreve-se, resumidamente, uma introdução à robótica, seguido de uma contextualização da necessidade do projeto e os objetivos propostos para a sua realização. Para finalizar, apresenta-se a calendarização do projeto.

No Capítulo 2 apresentam-se diversos conceitos relativos ao mundo da robótica, de modo a aprofundar o conhecimento nesta matéria, o que permitirá uma maior compreensão sobre como implementar e desenvolver uma solução de robótica.

No Capítulo 3 realiza-se uma pesquisa relativa à programação de robôs, falando-se dos métodos de programação de manipuladores industriais. Depois, é referido o *software* de programação *offline* da ABB e a sua linguagem de programação. Por fim, aborda-se o tema das redes industriais.

No Capítulo 4 explicam-se conceitos essenciais no mundo da robótica aplicados na indústria da fundição, de maneira a perceber-se quais as vantagens e desvantagens do uso de robótica nesta indústria e quais as medidas de segurança a aplicar. Por fim, apresentam-se diversos casos de estudo.

No Capítulo 5 inicia-se o processo de implementação das sete células robotizadas e apresenta-se o problema a resolver com este projeto. De seguida, descreve-se, de forma geral, o processo realizado por ambos os robôs. Depois, demonstra-se como foram validados todos os componentes das células e escolhidos os manipuladores industriais e finais. Em seguida, descreveram-se os testes realizados para verificar se os robôs se encontravam em sobrecarga. Por fim, é descrita a trajetória realizada por ambos os robôs.

No Capítulo 6 efetua-se a implementação das células desenvolvidas em ambiente *offline*. Inicialmente, demonstra-se a arquitetura do sistema, sendo explicado, depois, em forma de fluxogramas, o código referente aos 14 manipuladores robóticos que compõem este projeto. De seguida, refere-se a implementação das células através de várias imagens e explica-se o processo necessário à comunicação entre os vários componentes. Demonstram-se as verificações que os operadores que supervisionam as células necessitam de realizar para existir um correto funcionamento do posto de trabalho. Referem-se os testes realizados aos componentes das células robotizadas e, por último, apresenta-se o estudo realizado relativamente aos tempos de ciclo dos robôs.

Por fim, no Capítulo 7 explicam-se as conclusões desta dissertação e enumeram-se possíveis melhorias a efetuar quanto ao trabalho apresentado neste projeto.

Capítulo 2

Robótica industrial

Os primeiros robôs foram construídos com base numa ideia de que se fossem capazes de realizar uma grande quantidade de tarefas, iriam encontrar uma grande procura no mercado. Esta solução saiu muito cara, tanto em custo como em desempenho. Atualmente, os robôs são desenvolvidos com um determinado nível de especialização numa tarefa, ou seja, as suas características dependem de qual será a sua aplicação (Scheinman et al., 2016).

Quanto mais fácil se tornar a implementação de um robô, mais aplicações onde a robótica pode ser integrada irão surgir. Em conjunto com o controlador do robô é comum utilizar-se um *Programmable Logic Controller*¹ (PLC) ou *Computer Numerical Control*² (CNC). Utiliza-se também uma *Human-Machine Interface* (HMI)³, de forma a proporcionar um bom controlo da célula de robótica e dos seus componentes por parte do operador (Hägele et al., 2016).

Neste capítulo vão ser abordados conceitos importantes na robótica, mostrando, de seguida, as características de desempenho de um robô industrial. Depois, aborda-se a cinemática de um manipulador robótico, de modo a que se obtenha uma compreensão sobre os movimentos realizados pelo robô. Posteriormente, demonstram-se os vários tipos de geometrias que um manipulador robótico pode ter. Por fim, apresentam-se os componentes de uma célula de robótica.

2.1 Conceitos de robótica

Robótica é um tema complexo, sendo que para uma indústria investir neste mercado necessita de obter um certo nível de conhecimento. Assim, nesta secção são apresentados conceitos importantes no mundo da robótica.

¹Controlador Lógico Programável.

²Controlo Numérico Computadorizado.

³Consola de interface entre humano e máquina.

2.1.1 As três Leis de Asimov

O escritor Isaac Asimov, numa das suas histórias de ficção científica, mencionou a palavra “*robotics*”, e, com ela, trouxe três leis fundamentais, às quais todos os robôs tinham de obedecer ([Gibilisco, 2003](#)):

1. um robô não pode causar danos ou permitir danos em qualquer ser humano;
2. um robô tem de obedecer a qualquer ordem de um ser humano, exceto se a mesma contradisser a primeira lei;
3. um robô deve proteger-se a si próprio, exceto se isto contradisser as duas primeiras leis.

Estas leis ainda são consideradas boas normas para o comportamento dos robôs, mesmo tendo sido feitas na década de 1940.

2.1.2 Robô industrial

Um robô industrial é, por definição, um robô automaticamente controlado, reprogramável, com diversas funcionalidades, programável em três ou mais eixos, que podem ser fixos ou móveis, para usar em aplicações de automação industrial ([Hägele et al., 2016](#)).

Estes robôs são usados para combinar alta produtividade, qualidade e flexibilidade com custos reduzidos. Existem várias classes de robôs, dependendo da capacidade de carga, número de eixos e volume de trabalho. A escolha do robô é feita consoante a aplicação onde este se vai inserir, como por exemplo, montagem, paletização, pintura, soldadura, maquinação, *machine tending*⁴ ou *pick and place*⁵.

2.1.3 Segurança

Os manipuladores robóticos são máquinas potencialmente perigosas, no entanto, é pouco frequente o registo de acidentes. Para que este número se mantenha reduzido, existem três regras que os operadores que trabalham com robôs têm de ter em consideração ([Silva, 2012](#)):

1. mesmo que um robô não se encontre em movimento, isto não significa que não se irá mover;
2. se o robô se encontrar a realizar um ciclo de trabalho repetitivamente, isto não significa que o vai continuar a repetir;
3. respeitar a estrutura do robô e tudo o que a mesma pode fazer.

⁴Supervisão de uma máquina enquanto executa a sua função.

⁵Pegar num objeto e movimentá-lo para outra posição, pousando-o de seguida.

Resumindo, nunca se deve entrar no volume de trabalho do manipulador se este se encontrar alimentado, e o facto do robô estar imóvel não implica que irá continuar nesse estado.

De modo a prevenir acidentes, podem-se implementar medidas de proteção ativas e passivas. As medidas de proteção passivas são regras que visam evitar situações que possam resultar em acidentes, ou seja, regras empíricas e de bom senso ([Silva, 2012](#)):

1. dar formação aos operadores que vão trabalhar com o manipulador robótico;
2. atribuir responsabilidades evidentes na utilização e operação dos robôs industriais;
3. limitar o espaço de trabalho dos robôs ao mínimo necessário sem afetar o seu funcionamento;
4. definir zonas de segurança, de trabalho e de perigo;
5. o robô só deve ser operado em modo manual se se encontrar em erro ou em manutenção;
6. evitar roupas largas que possam ficar presas em componentes da célula de robótica;
7. se o robô se encontrar num ambiente perigoso, deve-se utilizar vestuário protetor apropriado;
8. implementar sistemas de extração de fumos e poeiras, proteção de cabos e tubos.

As zonas de segurança, de trabalho e de perigo do robô devem de ser assinaladas no chão da fábrica. A definição do tamanho das zonas de perigo tem de ter em conta o volume de trabalho dos robôs, o tempo de atuação dos sistemas de paragem de emergência e o tempo que o manipulador robótico demora a imobilizar-se totalmente ([Silva, 2012](#)).

As medidas de proteção ativas são destinadas a limitar as consequências dos acidentes com manipuladores robóticos quando as medidas de proteção passivas não conseguiram evitar que algo acontecesse. Exemplos deste tipo de medidas são os circuitos de paragem de emergência, sistemas que impedem o acesso à área onde o robô opera e proteções contra colisões.

Durante o funcionamento de uma célula de robótica, poderão acontecer situações imprevisíveis que resultem em colisões, entre o robô, o atuador final e os vários objetos que estejam dentro do volume de trabalho.

Dependendo do ambiente e aplicação onde o robô irá ser utilizado, se houver risco de colisões, poderão desenvolver-se soluções com determinadas medidas de proteção ativas e passivas para evitar e reduzir essas situações ([Scheinman et al., 2016](#)).

2.2 Características de desempenho de um robô industrial

Para se escolher o manipulador robótico pretendido, sendo que isso depende da aplicação onde este se vai inserir, é necessário compreender-se as características mais importantes no desempenho do robô. Assim, nesta secção apresentam-se características de desempenho de um robô industrial.

2.2.1 Capacidade de carga

Esta característica do robô é uma especificação primária que está interligada com a aceleração e a velocidade (Scheinman et al., 2016).

Capacidade de carga nominal é a carga máxima possível, à velocidade máxima, sem existir perda de precisão, e a capacidade de carga máxima é a carga máxima, a velocidade reduzida, sem perda de precisão. A importância desta especificação varia de acordo com a aplicação a que o robô está destinado (Silva, 2016).

Num robô desenvolvido para montagens, a aceleração e rigidez do mecanismo são mais importantes do que a velocidade e a capacidade de carga máxima, porque, em montagem de pequenos objetos, o tempo de ciclo do *pick and place* e a precisão desse movimento são muito importantes (Scheinman et al., 2016).

A capacidade de carga tem de ser vista em relação ao desempenho do robô como um todo, e não apenas como um simples valor fixo.

2.2.2 Exatidão

Esta especificação representa o quão próximo o *Tool Center Point* (TCP)⁶ consegue estar da localização do *target*⁷ definido. Esta característica está diretamente relacionada com a precisão da cinemática do braço do robô (tipo de juntas, comprimento dos elos e os ângulos das juntas), com a precisão do modelo de simulação e, também, do atuador final que irá ser utilizado (Scheinman et al., 2016).

Para robôs industriais, esta característica possui um erro de ± 10 mm, para robôs que não estão calibrados e não têm um modelo de simulação próximo da realidade, e ± 0.01 mm, para robôs com modelos de simulação exatos e calibrados.

2.2.3 Repetibilidade

A repetibilidade consiste na capacidade do robô conseguir voltar à mesma localização repetidamente. A maior parte dos fabricantes determina a repetibilidade indicando um ponto para onde o robô tem de se deslocar, fazendo isto várias vezes, mantendo o ponto, o posicionamento do robô, a mesma carga e as mesmas configurações (Scheinman et al., 2016).

⁶Ponto relativo ao centro do atuador final do robô.

⁷Ponto programado para ser atingido pelo TCP do robô.

Depois disto, vão ser gerados vários pontos, porque a repetibilidade não é ideal, ou seja, haverá sempre um determinado erro. Esse erro corresponde ao raio da esfera gerada pelos vários pontos que foram criados, como se pode observar na Figura 2.1.

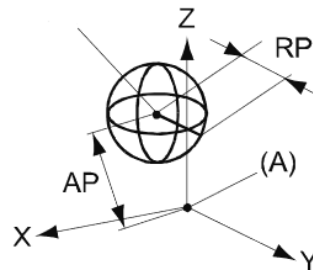


Figura 2.1: Representação das características repetibilidade (RP) e exatidão (AP) (ABB, d).

Em tarefas repetitivas, como por exemplo, a soldadura, a repetibilidade é uma característica importante. Para robôs de soldadura de grande dimensão, a precisão da repetibilidade está entre 1 mm e 2 mm, e, para robôs com posicionamento de alta precisão, chega a 0.005 mm (Scheinman et al., 2016).

2.2.4 Resolução

A resolução representa o menor incremento possível, de um ponto a outro, que o robô consegue efetuar. Esta característica é muito importante para movimentos controlados por sensores. A resolução costuma variar entre 0.001 e 0.5 mm (Scheinman et al., 2016).

2.2.5 Velocidade

A velocidade máxima de uma junta, angular ou linear, varia de acordo com certos parâmetros. Por exemplo, para movimentos mais longos, esta velocidade, normalmente, é limitada pela tensão do servomotor ou pela velocidade máxima do motor (Scheinman et al., 2016).

Mesmo que um robô possua acelerações elevadas, movimentos *Point-To-Point*⁸ (PTP) podem ser limitados na velocidade. Em robôs com acelerações baixas, só movimentos mais longos terão limites na velocidade. Em robôs grandes ou rápidos, a velocidade máxima pode atingir cerca de 50 m/s.

2.2.6 Aceleração

Na maioria dos robôs, como o peso da carga que tem de ser carregada é pequeno comparado com o peso deste, dá-se mais destaque à aceleração do robô do que propriamente

⁸Movimentos ponto a ponto.

à carga. Robôs que apresentem uma maior capacidade de aceleração, tendem a apresentar mais rigidez (Scheinman et al., 2016).

A aceleração apresenta uma maior importância em robôs de desempenho elevado, em comparação com a velocidade e a capacidade de carga.

2.2.7 Tempo de vida dos componentes e tempo de ciclo

Numa célula de robótica, os componentes que causam maiores problemas, em termos de falhas, são os atuadores, as transmissões, a fonte de energia e os cabos dos sinais. Em média, o tempo que deveria passar entre falhas no sistema (*Mean Time Between Failures* (MTBF)), deveria ser no mínimo 5000 h, e, em termos dos componentes mais importantes das células, deveria ser de 10 000 h de funcionamento até que fosse necessário realizar-se uma manutenção preventiva. (Scheinman et al., 2016).

Como a maior parte das células de robótica são utilizadas para tarefas repetitivas, é necessário ter-se em conta os piores casos no que diz respeito a ciclos de movimento. Para movimentos pequenos (menos de 5% do alcance de uma junta), deve ser possível realizar-se entre 20 e 100 milhões de ciclos completos e bidirecionais. Em movimentos grandes (acima de 50% do alcance de uma junta), serão cerca de 5 a 40 milhões de ciclos.

Em longo termo, o desempenho de um robô começa a ser afetado pelo aquecimento do motor. Para se conseguir gerir esta situação, pode-se antecipar qual será o tempo de ciclo que vai ser utilizado, e, com isso, usar-se um motor mais leve, mais pequeno e com menor inércia. A maior parte dos robôs industriais são substituídos antes de atingirem o seu tempo de vida estipulado.

2.3 Cinemática de um robô industrial

Uma célula de robótica é um sistema complexo com muitas variantes, sendo o robô uma parte essencial do funcionamento da mesma. Para se compreender o funcionamento da movimentação do manipulador dentro da célula, apresentam-se, de seguida, noções essenciais relativas à sua cinemática.

2.3.1 Graus de liberdade

Este termo está relacionado com os diversos movimentos que o manipulador consegue realizar. Esses movimentos podem ser simulados através do braço humano: se se esticar o braço para a frente, fazendo-se um ângulo de zero graus, é possível movimentá-lo de três maneiras, para cima e para baixo (*pitch*), para a esquerda e para a direita (*yaw*) e em movimento rotacional (*roll*). Sendo assim, o ombro humano possui três *Degrees Of Freedom*⁹ (DOF) (Gibilisco, 2003).

⁹Graus de liberdade.

Movimentando-se o antebraço, mantendo-se o braço e o ombro na mesma posição, percebe-se que o cotovelo tem apenas uma possibilidade de movimentação: para cima e para baixo. Sendo assim, o cotovelo possui um DOF.

Agora, movendo-se apenas o pulso, depreende-se que este consegue movimentar-se para os lados, para cima e para baixo, e consegue, também, realizar um movimento rotacional, portanto, o pulso contém três DOF (*yaw*, *pitch* e *roll*). Resumindo, o conjunto ombro, cotovelo e pulso contém sete DOF.

Num braço robótico, três DOF seriam suficientes para atingir qualquer ponto dentro do seu volume de trabalho. Contudo, para possibilitar uma maior versatilidade e aumentar a quantidade de movimentos possíveis, este possui seis DOF. A Figura 2.2, ilustra o manipulador IRB 4600, da empresa ABB, com seis DOF, sendo que as letras representam os eixos do robô.

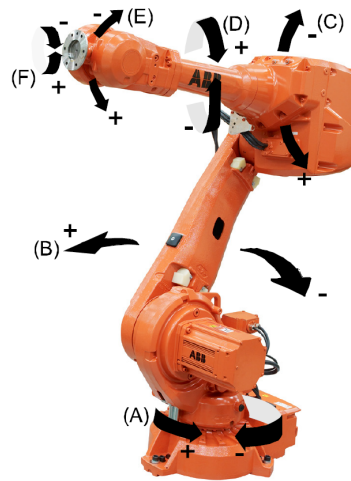


Figura 2.2: Manipulador IRB 4600 da ABB (ABB, d).

2.3.2 Juntas

Uma junta cinemática é uma ligação entre dois elos¹⁰, que limita o seu movimento relativo, sendo que ambos os corpos conseguem mover-se um sob o outro. Existem diversos tipos de juntas, tais como as rotacionais e as prismáticas. Um mecanismo de juntas, num robô, é composto por quatro componentes principais: a estrutura dos eixos das juntas, um atuador, transmissão e um sensor de estado (para controlo da posição e velocidade) (Waldron and Schmiedeler, 2016).

Para manipuladores que têm a sua aceleração de carga máxima com 0.5 g, a gravidade e o binário são mais importantes que a inércia do sistema. Isto faz com que os atuadores possam ser posicionados perto das juntas.

Para manipuladores em que a aceleração da carga atinge o seu pico com 3–10 g ou mais, é importante a inércia do sistema ser minimizada. Nestes casos, os atuadores são

¹⁰Corpos rígidos individuais que formam o robô.

colocados perto do eixo da primeira junta do braço robótico para reduzir o impacto da inércia, sendo que são usados equipamentos como correias e cabos para conduzir as juntas.

Aumentando-se a distância de transmissão, vai-se reduzir a massa e inércia, introduzindo-se flexibilidade e reduzindo a rigidez do sistema.

2.3.3 Cinemática

Cinemática é a ciência que estuda a movimentação da geometria, baseando-se na posição, orientação e derivadas de tempo. Em robótica esta ciência é fundamental para se definirem equações para dinâmica e controlo dos manipuladores ([Jazar, 2010](#)).

Como demonstra a Figura 2.3, são essenciais dois tipos de cinemática, a direta e a inversa.

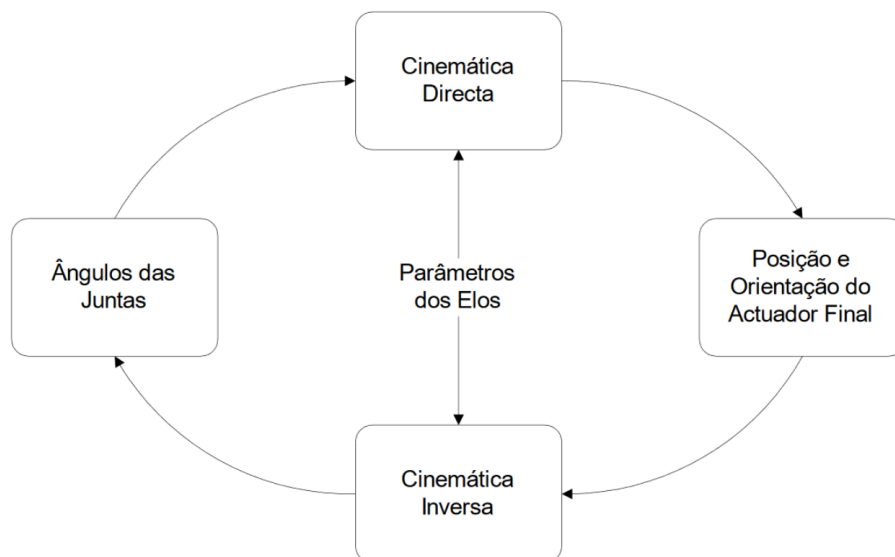


Figura 2.3: Relação entre cinemática direta e inversa ([Laloni and Wahl, 1995](#)).

Cinemática direta

A cinemática direta baseia-se em se saber qual será a posição do atuador final de acordo com o posicionamento das juntas. Com este método só existe uma solução, visto que se as juntas se encontram numa certa posição, o atuador final vai acabar sempre na mesma posição ([Owen-Hill, 2015](#)).

Cinemática inversa

Este método é utilizado para se saber em quais posições o robô deve ser colocado para o atuador final se posicionar numa certa posição. Ao contrário da cinemática direta, neste método os robôs podem ter múltiplas soluções para atingir os mesmos pontos ([Owen-Hill, 2015](#)).

2.3.4 Singularidades

Uma singularidade é causada pela cinemática inversa do robô. Esta acontece quando um ponto consegue ser acedido por infinitas maneiras possíveis (diferentes configurações de juntas), de acordo com a cinemática. Singularidades ocorrem em pontos extremos de um volume de trabalho, ou quando duas ou mais juntas se colocam em certas posições ([Ang, 1991](#); [Owen-Hill, 2016](#)).

Em robôs de seis DOF existem três tipos de singularidades ([Owen-Hill, 2016](#)):

1. singularidades do pulso: acontecem quando os eixos quatro e seis do robô se alinham um com o outro, fazendo com que estas juntas tentem rodar 180° instantaneamente;
2. singularidades do ombro: acontecem quando há um alinhamento do eixo um do robô com o centro do punho do robô, fazendo com que as juntas um e quatro tentem rodar 180° ;
3. singularidades do cotovelo: acontecem quando o eixo dois e três entram no mesmo plano do punho do robô.

Para se evitar singularidades pode-se, por exemplo, adicionar um pequeno ângulo ao atuador final que vai ser utilizado, fazendo com que as juntas nunca se alinhem totalmente ou que uma junta atinja 0° .

2.3.5 Volume de trabalho

O volume de trabalho de um manipulador robótico é o volume total que o atuador final consegue atingir. Este volume é delineado não só pela geometria do manipulador, mas também pelas restrições mecânicas das juntas ([Jazar, 2010](#)).

O volume de trabalho pode ser dividido em duas partes: o atingível e o flexível, sendo que o primeiro caso representa o espaço que o atuador final consegue atingir em pelo menos uma orientação e, o segundo caso, representa o espaço em que o atuador final consegue atingir cada ponto em todas as orientações possíveis.

Esta característica do manipulador robótico é essencial para definir as localizações e distâncias dos componentes nas células de robótica. A Figura 2.4 representa um corte do espaço de trabalho do robô KR 16 S da empresa Keller Und Knappich Augsburg (KUKA).

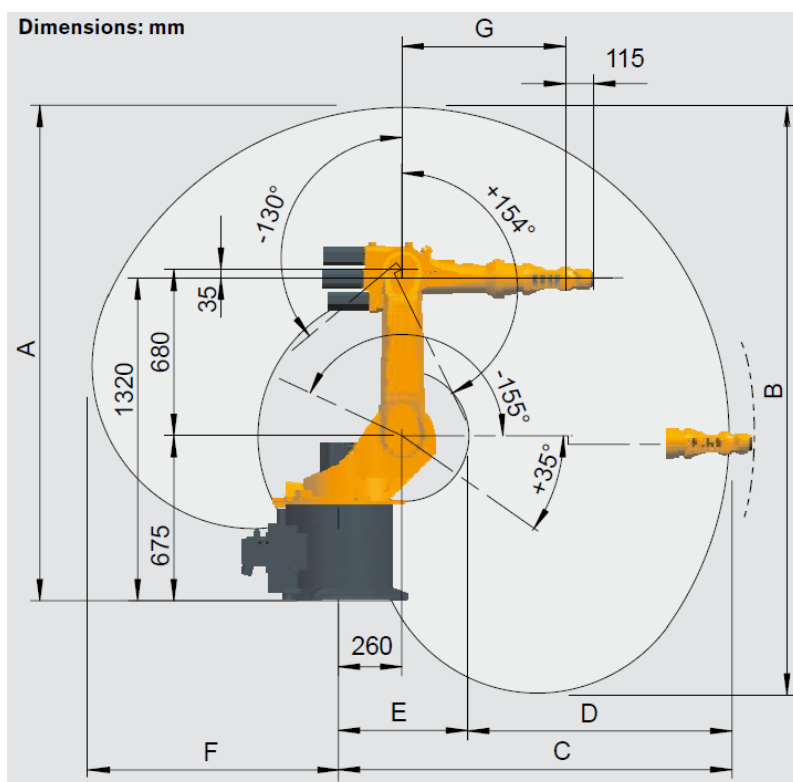


Figura 2.4: Volume de trabalho do robô KR 16 S da KUKA (KUKA).

2.3.6 Sistemas de controlo de movimento

A atuação individual das juntas tem de ser realizada de maneira coordenada, de modo a que o manipulador robótico consiga efetuar a movimentação pretendida. Os controladores que efetuam essa atuação estão organizados de maneira a fornecer a cada junta um sistema de controlo individual, sendo que estes controladores possuem, também, um controlo que permite coordenar todas as atuações nas diferentes juntas de acordo com a sequência do programa do robô (Groover, 2007).

Existem quatro tipos de controlo que podem ser utilizados, dependendo da aplicação do manipulador: sequência fixa, PTP, *Continuous Path*¹¹ (CP) e controlo inteligente (Groover, 2007).

2.4 Tipos de robôs

Um robô que contenha uma estrutura cinemática que não faz uma malha fechada designa-se por robô em série ou manipulador em malha aberta. Se um robô tiver uma estrutura que feche a malha é designado por robô em paralelo ou manipulador em malha fechada. Um robô pode também ser designado de híbrido se contiver ambas as definições referidas neste parágrafo (Jazar, 2010).

¹¹Trajetória contínua.

As juntas dos manipuladores robóticos podem ser rotacionais (R) ou prismáticas (P), sendo que qualquer outro tipo de junta pode ser modelado usando-se estes dois tipos. As três primeiras juntas dos robôs em série definem a sua classificação, sendo que com os dois tipos de juntas referidos, são possíveis identificar 72 tipos diferentes de configurações de manipuladores industriais.

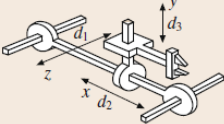
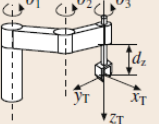
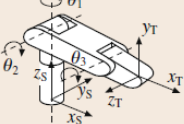
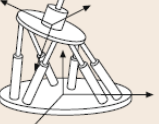
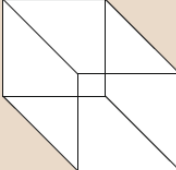
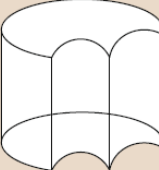
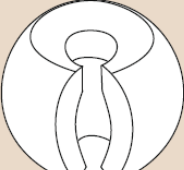
As configurações mais importantes são a PPP (cartesiana), a RRP (esférica), a RRP (*Selective Compliance Articulated Robot Arm* (SCARA)), a RRR (articulada), a RPP (cilíndrica) e a paralela.

A Tabela 2.1 sintetiza quatro configurações de manipuladores robóticos, apresentando algumas das suas características. Na segunda coluna da tabela está demonstrada a configuração cartesiana, contendo três juntas prismáticas, sendo que está representado o seu volume de trabalho e um exemplo de um manipulador.

Na terceira coluna está representada a configuração SCARA, contendo uma junta prismática e duas rotacionais, sendo que também está demonstrado o seu volume de trabalho e um exemplo de um manipulador. Na quarta coluna está representada a configuração articulada, contendo três juntas rotacionais, com o seu volume de trabalho e um exemplo de um manipulador.

Na última coluna está representada a configuração em malha fechada, ou paralela, que consta em três, quatro ou seis eixos prismáticos, o seu volume de trabalho e um exemplo de um manipulador.

Tabela 2.1: Estruturas mecânicas de robôs industriais (Hägele et al., 2016).

Category	Gantry (or Cartesian)	SCARA	Articulate	Parallel
Robot main axes structure	 3 prismatic joints	 1 prismatic and 2(3) revolute joints	 3 revolute joints	 Typically with 3, 4 or 6 prismatic axis
Workspace shape				
Technical example				

2.5 Célula de robótica

Salientando os aspetos mais importantes, uma célula de robótica é constituída pelos robôs com os respetivos controladores, os atuadores finais, os sensores, os atuadores, os dispositivos de segurança e controlo e, em certos casos, os PLC. O custo de uma célula de robótica completa é, normalmente, quatro vezes superior ao custo individual do robô ([Hägele et al., 2016](#)).

2.5.1 Manipulador

O manipulador é um conjunto de elos ligados por juntas que formam sistemas cinemáticos que geram uma estrutura mecânica. No manipulador estão presentes os atuadores, que atuam sobre a estrutura mecânica, e a transmissão, que liga os atuadores à estrutura mecânica ([Lopes, 2001](#)).

Um manipulador torna-se um robô quando o atuador final é acoplado e o sistema de controlo implementado. No entanto, as expressões robô e manipulador são usadas com significado equivalente ([Jazar, 2010](#)).

A Figura 2.5 representa o manipulador R-1000iA/100F da empresa Fuji Automatic NUmérica Control (FANUC).



Figura 2.5: Manipulador R-1000iA/100F da FANUC ([FANUC, b](#)).

2.5.2 Controlador

O controlador é o dispositivo que controla a operação e movimentação do robô. Este aparelho possui uma *Central Processing Unit* (CPU), que é semelhante à de um computador, sendo que as instruções de movimento são guardadas na *Random-Access Memory* (RAM) e num disco rígido ([Gibilisco, 2003](#)).

Um controlador tem três objetivos: o primeiro é o processamento e armazenamento dos dados recebidos dos sensores do manipulador; o segundo é o papel de decidir qual a

movimentação geométrica que o robô deve realizar; o terceiro é a parte da comunicação, que consiste em organizar a troca de informação entre o manipulador e o ambiente da célula de robótica (Jazar, 2010).

Um controlador possui, também, uma interface que permite a comunicação entre o mesmo e o operador. No caso da empresa de robótica ABB, os seus controladores, como se pode observar na Figura 2.6, possuem uma consola designada por FlexPendant (ABB, b).



Figura 2.6: Controlador IRC5, com o FlexPendant, da ABB (ABB, b).

A empresa de robótica KUKA utiliza o sistema operativo Windows nos seus controladores e consolas de interface com o utilizador, o que facilita a interação com o utilizador, tornando, também, mais simples a interligação por rede. Utilizando-se o Windows, o desenvolvimento do *software* do controlador demonstra ser mais barato do que um sistema à medida (Silva, 2016).

2.5.3 Atuadores finais

O atuador final é o componente do manipulador robótico que é montado no último elo, sendo necessário para o robô realizar a tarefa a que está destinado. Os atuadores finais mais simples são garras (*grippers*) com duas funções: abrir e fechar.

Os componentes que realizam trabalho num robô são as garras ou as ferramentas que estão acopladas no último elo do manipulador. O manipulador robótico serve para movimentar e orientar estes componentes para as posições necessárias à execução das tarefas (Jazar, 2010).

Garras

Uma garra é um atuador final utilizado para manipular objetos durante o ciclo de trabalho do manipulador robótico. Define-se esta manipulação como a movimentação dos objetos de um sítio da célula de robótica para outro. Dependendo do objeto que se pretende

manipular, existem diversas garras que se adequam à tarefa a realizar: garras mecânicas, garras de sucção e garras magnéticas (Groover, 2007).

A Figura 2.7 ilustra uma garra mecânica com duas pinças.

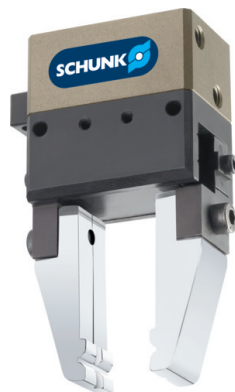


Figura 2.7: Garra mecânica da empresa SCHUNK (SCHUNK).

Ferramentas

As ferramentas são atuadores finais necessários quando o manipulador robótico tem a tarefa de realizar trabalho sobre um objeto. Exemplos de ferramentas são as pinças para soldadura por pontos, tochas para soldadura por arco elétrico, pistolas de pintura, ferramentas de corte por jato de água e chaves de fendas automáticas (Groover, 2007).

No caso do manipulador robótico utilizar ferramentas, este tem de efetuar um controlo do atuador final relativo à operação da ferramenta, enviando sinais de controlo para esta iniciar e parar o seu funcionamento. Em certas tarefas na indústria são necessárias diversas ferramentas, fazendo com que o robô tenha de ser capaz de efetuar trocas rápidas do tipo de ferramenta durante o mesmo ciclo de trabalho.

2.5.4 Sensores

Os sensores são utilizados para recolha e armazenamento de informação relativa a estados internos e externos do manipulador. Na robótica industrial há dois tipos de sensores essenciais: os internos e os externos.

Os sensores internos são utilizados no controlo da velocidade e posição de cada uma das juntas do manipulador. Os sensores externos são utilizados para possibilitar a coordenação entre o manipulador e os outros equipamentos que se encontram na célula de robótica (Jazar, 2010; Groover, 2007).

Na categoria de sensores externos encontram-se os sensores sem contacto, que conseguem monitorizar um alvo sem a existência de qualquer contacto, sendo que isto fornece inúmeras vantagens, tais como a capacidade de fornecer respostas rápidas em relação a objetos em movimento, elevada resolução nas medições e deteção de objetos pequenos (Kretschmar and Welsby, 2005).

Como se pode observar na Figura 2.8, um sensor sem contacto (capacitivo ou indutivo) é formado por uma sonda, que é o dispositivo onde o campo de deteção é gerado, e um *driver*, que é onde é gerado o resultado da medição. Em certos sensores estes dispositivos encontram-se integrados.

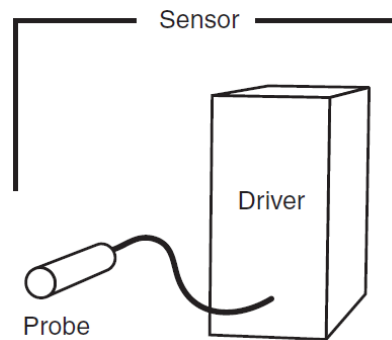


Figura 2.8: Sistema de sensor sem contacto (Kretschmar and Welsby, 2005).

Sensores capacitivos

Os sensores capacitivos são dispositivos sem contacto usados para detetar, com precisão, a posição de um objeto condutor ou a espessura de um objeto não condutor. Estes sensores não são afetados pelo material pelo qual o objeto condutor é composto (Kretschmar and Welsby, 2005).

Estes dispositivos detetam a superfície do objeto condutor, fazendo com que a espessura do material não cause complicações nas medições.

Sensores indutivos

Sensores indutivos são dispositivos usados para detetar a posição de um objeto condutor, sem a necessidade de existir contacto entre ambos. Estes sensores não são afetados por partículas que se coloquem à sua frente, fazendo com que sejam ideais para ambientes hostis (Kretschmar and Welsby, 2005).

Os sensores indutivos são sensíveis ao tipo de material do objeto que têm de identificar, fazendo com que, para se atingir uma boa *performance*, seja necessário realizar-se uma calibração.

Sensores táteis

Estes sensores são usados para determinar se existe contacto entre um certo objeto e o sensor. Este tipo pode ser útil quando se pretende controlar a força com que um atuador final pressiona um dado objeto, sendo isto uma característica importante, visto que o objeto não pode ser danificado (Groover, 2007).

2.5.5 Atuadores

Um atuador é um dispositivo que movimenta uma ou mais juntas, operando o atuador final num braço robótico. Os atuadores mais simples consistem em motores elétricos, sendo que atuadores mais sofisticados envolvem o uso de hidráulica, pneumática ou eletromagnetismo ([Gibilisco, 2003](#)).

O número de atuadores necessários depende de qual será a aplicação onde o robô vai ser utilizado e do número de graus de liberdade e rotações do mesmo. Os atuadores são ajustados à medida dependendo do manipulador onde vão ser utilizados, ou seja, a escolha dum atuador é feita de acordo com a utilização que se pretende dar ao robô ([Scheinman et al., 2016](#); [Gibilisco, 2003](#)).

Atuador hidráulico

Atuadores hidráulicos eram muito utilizados no início da robótica industrial. Estes convertem o poder da hidráulica em energia mecânica. O movimento mecânico produzido é linear, se forem utilizados cilindros hidráulicos, ou rotativo para motores hidráulicos. Estes atuadores possuem diversas vantagens e desvantagens devido à elevada pressão que usam ([Scheinman et al., 2016](#)).

Como vantagens, estes atuadores conseguem obter uma capacidade de carga elevada, possuem autolubrificação e arrefecimento e conseguem funcionar em sobrecarga sem haver danos. Como desvantagens, estes atuadores apresentam um preço elevado, podem aparecer fugas devido ao movimento das juntas do manipulador robótico e obrigam à existência de reservatórios de fluido e sistemas de alta pressão ([Silva, 2016](#)).

Atuador elétrico

Atualmente, o tipo de atuadores mais utilizado em manipuladores robóticos são os eletromagnéticos, sendo uma das razões o seu baixo preço. Estes atuadores são rápidos e precisos, conseguindo, também, efetuar trajetórias complexas ([Silva, 2016](#)).

Apesar da sua elevada utilização, estes atuadores apresentam algumas limitações, tais como problemas de sobreaquecimento quando se encontram em sobrecarga e a necessidade do uso de travões para se manterem em posição ([Scheinman et al., 2016](#)).

Este tipo de atuação pode ser utilizado para efetuar o controlo de garras mecânicas, efetuando o controlo da força com que a garra fecha e a sua velocidade, sendo que não é necessária a existência duma linha de ar comprimido, havendo assim uma redução de custos. Em contrapartida, é necessário levar-se os sinais elétricos até ao punho do robô ([Silva, 2017](#)).

Atuador pneumático

Os atuadores pneumáticos apresentam semelhanças com os hidráulicos, sendo que estes convertem ar comprimido em movimentos mecânicos, que podem ser lineares, para cilindros

pneumáticos, ou rotativos, para motores. Um sistema pneumático consiste no gerador pneumático (produz o ar comprimido), no atuador, nas suas válvulas (usadas para controlar a pressão e direção) e os tubos por onde o ar circula (Scheinman et al., 2016).

Estes atuadores são fáceis de controlar e apresentam um baixo custo, são seguros em ambientes explosivos e são menos afetados pela temperatura ambiente comparando com os atuadores elétricos (Scheinman et al., 2016).

Apesar de poder ser apenas necessário o uso de fontes típicas de ar das fábricas, se existir um uso extensivo dos atuadores pneumáticos, é necessária a instalação de uma fonte de ar comprimido dedicada, fazendo com que estes atuadores possuam baixa eficiência energética. Estes atuadores não são usados em aplicações que exijam forças elevadas, visto que produzem menos potência que os atuadores hidráulicos e elétricos (Scheinman et al., 2016).

Este tipo de atuação em garras mecânicas apresenta um custo reduzido por ser simples de implementar, sendo facilmente integrado na linha de produção. Apesar destas vantagens, a garra apresenta-se sempre no extremo do seu curso de funcionamento e não há um bom controlo relativo à força e velocidade da garra. São também necessários sensores externos para se detetar se a garra se encontra aberta ou fechada (Silva, 2017).

2.5.6 Dispositivos de segurança

Uma das formas de implementar segurança numa célula de robótica é a utilização de medidas de proteção ativas. Uma dessas medidas é o circuito de paragem de emergência. Estes circuitos costumam possuir um botão de paragem, um botão de rearme às emergências e um botão de arranque do sistema.



Figura 2.9: Exemplo de botões de emergência da empresa ABB (ABB, 2018).

Outra medida é a vedação das células robotizadas que impeçam os operadores de entrar no volume de trabalho do robô quando este estiver em funcionamento.

2.5.7 Controlador Lógico Programável

Em certas aplicações de robótica, a implementação das células robotizadas torna-se mais simples com a utilização de controladores lógicos programáveis.

Estes dispositivos são microcomputadores que contêm instruções na sua memória programável que servem para implementar lógica, sequências, temporizadores, contadores e funções aritméticas através de módulos de entradas e saídas analógicas ou digitais, para controlar processos e máquinas em linhas de produção industriais (Groover, 2007).

Os PLC, que foram introduzidos por volta de 1970, vieram substituir controladores compostos por relés, bobinas, contadores, temporizadores e outros componentes que eram usados para implementar o mesmo controlo que estes dispositivos efetuam. Com os PLC, tudo isto se tornou mais simples e dinâmico.

A Figura 2.10 apresenta o controlador lógico programável da série NX7 da empresa Omron.



Figura 2.10: PLC da série NX7 da empresa Omron (Omron, 2019).

2.5.8 Interligação dos componentes

A Figura 2.11 apresenta a forma como os diversos componentes do manipulador robótico interagem com o controlador. Para a unidade de controlo saber qual a tarefa a desempenhar pelo manipulador, é efetuada a programação do braço robótico relativa à descrição da tarefa.

No controlador encontra-se o protocolo de comunicação que vai ser utilizado para existir a troca de informação entre os diversos componentes. É também aqui que são geradas as trajetórias que vão ser efetuadas pelo manipulador robótico. No controlador encontra-se o algoritmo de controlo e os modelos do manipulador e do ambiente em que o mesmo está inserido.

Após o controlador possuir toda a informação necessária, este envia para a unidade de potência, que vai fornecer a informação e, também, a energia necessária para todos os componentes do manipulador funcionarem. Os sensores externos fornecem a informação relativa ao ambiente ao controlador, sendo que os internos fornecem informação sobre o estado do manipulador.

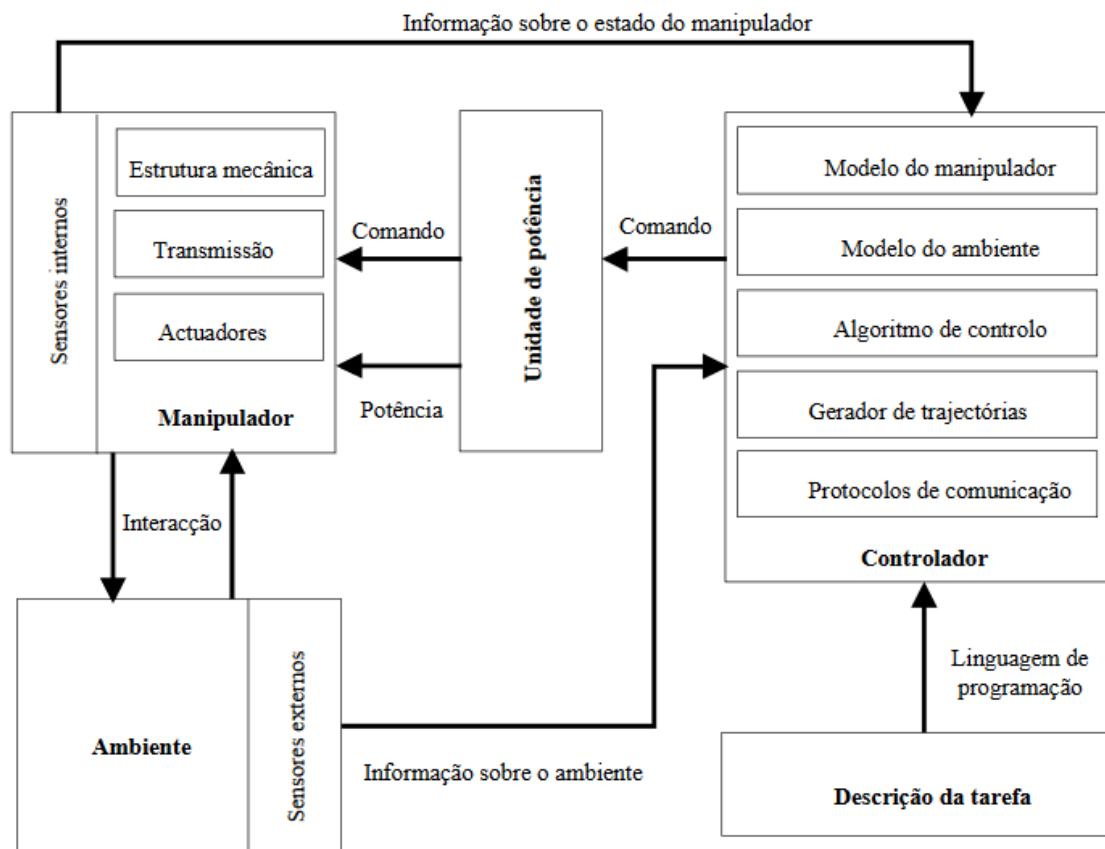


Figura 2.11: Arquitetura de um robô (Lopes, 2001).

No caso de se utilizar um PLC na célula de robótica, este dispositivo normalmente costuma comandar as operações dos componentes, ou seja, é o *master* (mestre), sendo o robô o *slave* (escravo).

É o controlador lógico programável que envia a informação, vinda dos componentes da célula, para o robô. Assim, o manipulador robótico sabe quais as tarefas que tem de efetuar no seu ciclo de trabalho.

2.6 Conclusão do capítulo

Este capítulo serve como base introdutória ao mundo da robótica industrial, sendo que foram apresentados conceitos importantes de robótica, de modo a obter-se um maior conhecimento do tema em geral. De seguida, foram apresentadas as características de desempenho mais importantes do manipulador robótico, de forma a se compreender quais as características que um potencial comprador tem de ter em conta.

Depois, apresentam-se noções relativas à cinemática e movimentação de um manipulador robótico, tendo em vista uma maior compreensão deste assunto para se entender como desenvolver a célula de robótica onde este se vai inserir. Em seguida, apresentam-se os

diversos tipos de configurações de manipuladores robóticos existentes. Para finalizar, são descritos os diversos componentes que compõem uma célula robotizada.

Capítulo 3

Programação de robôs industriais

A programação de robôs é o processo realizado por programadores tendo em vista a criação de um programa que permite a um manipulador industrial realizar a tarefa requerida. Um programa robótico pode ser definido como uma trajetória no espaço a ser realizada pelo manipulador robótico, juntamente com as ações periféricas definidas no ciclo de trabalho (abrir e fechar a garra, decisões lógicas, comunicação entre equipamentos). Um robô, com os programas que se encontram no seu controlador, consegue realizar tarefas complexas, sendo que esses programas são flexíveis, podendo ser alterados (Groover, 2007; A.K. Gupta, 2016; F. A. Bravo and González, 2017).

Um programa de um manipulador robótico pode ser tão simples quanto ter um certo número de respostas pré-programadas para determinados eventos. No futuro, a robótica vai tender para o desenvolvimento de programas inteligentes que conseguirão aprender com ações passadas, tomando as melhores decisões dependendo da situação que encontrem.

Neste capítulo vão ser abordados diferentes métodos de programação de manipuladores industriais e a sua utilidade. Efetuou-se, ainda, uma pesquisa relativa ao *software* de programação *offline* da ABB e a linguagem utilizada. Por último, aborda-se o tema redes de comunicação industrial.

3.1 Métodos de programação de robôs

A tarefa principal da programação de manipuladores robóticos é o controlo da movimentação e das ações do robô. Um manipulador é programado inserindo-se o código desenvolvido na memória do controlador. Entre as diversas técnicas de programação existentes vão ser referidas as seguintes: programação *offline* e programação *online* (A.K. Gupta, 2016).

3.1.1 Programação *offline*

A programação *offline* é o desenvolvimento de um programa robótico, parcial ou completo, sem a necessidade do manipulador industrial. Isto inclui a criação dos pontos a ser

atingidos pelo robô e a lógica do ciclo de trabalho (Yong and Bonney, 1999). Com o avanço da tecnologia, esta programação está a tornar-se cada vez mais eficiente.

Na robótica, esta programação contribui para o decréscimo do tempo necessário para programar robôs, sendo essa diminuição diretamente proporcional à evolução do desempenho dos *Personal Computer* (PC) (Inaba and Sakakibara, 2009).

A Figura 3.1 ilustra o programa da ABB, RobotStudio, utilizado para programação *offline* de manipuladores robóticos desta empresa.

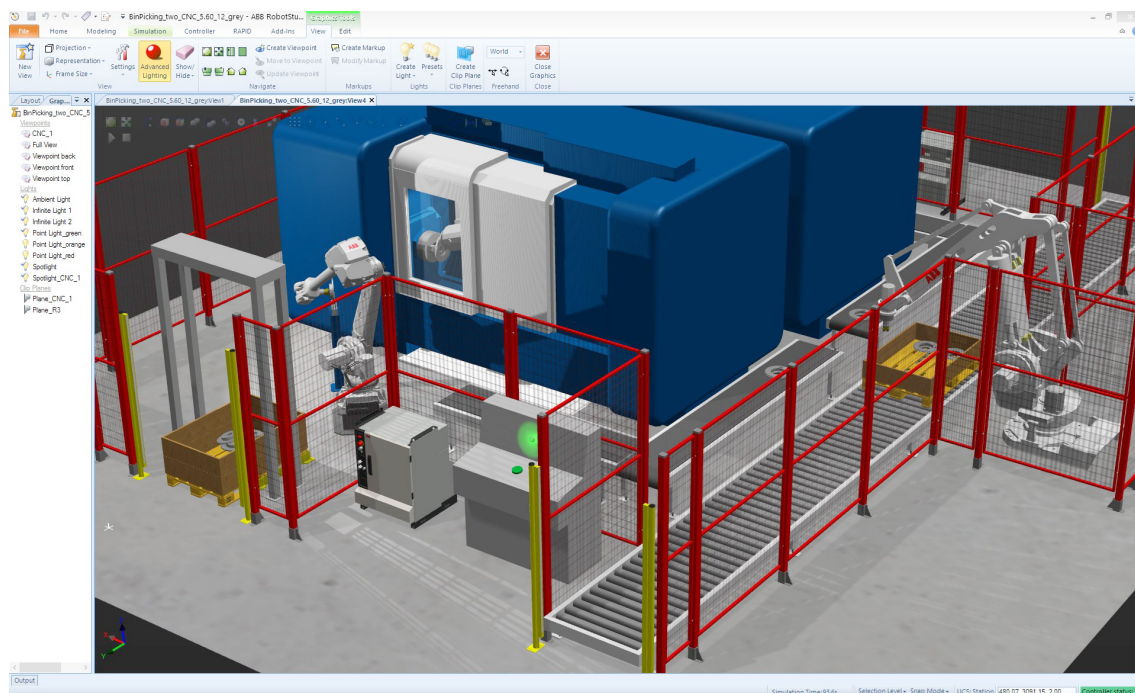


Figura 3.1: Exemplo de aplicação no *software* ABB RobotStudio (ABB, f).

Vantagens do uso de programação *offline*

As vantagens do uso de programação *offline* são as seguintes (A.K. Gupta, 2016):

1. redução do tempo de inatividade, porque o manipulador industrial não necessita de parar a produção para ser programado;
2. o programador não necessita de estar em certos ambientes industriais, como por exemplo, na indústria da fundição, onde existe muita poluição;
3. integração com sistemas *Computer-Aided Design* (CAD)/*Computer-Aided Manufacturing* (CAM)¹;
4. reutilização de dados CAD;
5. simplificação de tarefas complexas, com a utilização de programas de computador avançados para determinados processos;

¹*Software* de criação de componentes das células de robótica.

6. verificação dos programas do robô. Com os sistemas CAD/CAM e o sistema *offline* de programação, é possível criar-se um modelo de simulação da célula de robótica que irá permitir o controlo de erros, evitando colisões na trajetória do manipulador robótico.

Requisitos de um sistema *offline*

Um sistema *offline* acelera a implementação de *Flexible Manufacturing System* (FMS)². Para um sistema de programação *offline* ser corretamente utilizado existem certos requisitos essenciais (Yong and Bonney, 1999):

1. um modelo da célula a três dimensões com os dados de todos os componentes;
2. conhecimento do processo ou tarefa a ser programada;
3. conhecimento relativo à geometria, cinemática e dinâmica do manipulador robótico;
4. um *software* de computador para realizar a programação dos robôs, utilizando os dados dos primeiros três pontos;
5. verificação dos programas realizados pelo *software* referido no ponto quatro. Por exemplo, verificar singularidades e colisões;
6. interface homem-máquina simples para facilitar a programação.

Erros e imprecisões do mundo real

Uma simulação *offline* do modelo da célula de robótica, para se aproximar do ideal, ou seja, para ser muito próxima da célula real, necessita de um nível de planeamento e execução que muitas empresas não têm. Portanto, quando há a transferência do programa para a realidade, há sempre incoerências.

1) O manipulador robótico

A soma de pequenos erros na estrutura do robô produz erros maiores na deslocação do atuador final. A falta de rigidez da estrutura robótica pode causar diversos erros quando este se encontrar com carga elevada. Dois manipuladores robóticos da mesma gama não vão obter um desempenho totalmente igual com o mesmo programa *offline*. Isto acontece devido a problemas relativos à calibração do robô (Yong and Bonney, 1999).

2) O controlador do robô

O controlador do manipulador robótico apresenta uma resolução insuficiente para não apresentar erros relativos à trajetória do robô. A precisão numérica do controlador também aumenta o erro entre a simulação *offline* e a célula real, sendo que quanto maior for

²Sistema flexível a mudanças de componentes nas células de trabalho.

mais precisão existe (Yong and Bonney, 1999).

3) A célula de robótica

Existe uma dificuldade em determinar as localizações exatas dos componentes da célula de robótica (manipuladores robóticos, dispositivos periféricos, peça a manipular). O ambiente onde o robô se encontra também afeta o seu desempenho, introduzindo erros entre a programação *offline* e a realidade (Yong and Bonney, 1999).

4) A modelação e o sistema de programação

A precisão numérica do *software* utilizado na programação e a experiência do programador também introduzem erros (Yong and Bonney, 1999).

3.1.2 Programação *online*

A programação *online* é realizada pelo programador na célula de robótica onde o manipulador se encontra, utilizando-se a consola do robô para movimentá-lo para os pontos que vão formar a trajetória pretendida. O operador observa o robô e o seu movimento em conjunto com todos os componentes da célula. O processo de programação também envolve a edição do código do programa (permite corrigir pontos incorretos e alteração da lógica) e a repetição da trajetória programada. A informação relativa às coordenadas dos pontos e à lógica desenvolvida são ensinadas ao manipulador robótico e armazenadas na memória da consola, sendo, depois, transferida para o controlador do robô (A.K. Gupta, 2016).

Durante o processo de marcação de pontos do manipulador robótico, o programador pode repetir as trajetórias configuradas para fazer verificação de erros no código, tanto dos pontos marcados como da lógica programada. A programação pode ser realizada totalmente pelo *Teach Pendant*³. Neste tipo de programação, o programador pode estar a realizar o seu trabalho dentro do espaço de trabalho do manipulador robótico com os dispositivos de segurança inativos, podendo tornar a programação perigosa. A programação *online* é um método fácil e conveniente quando as tarefas são simples, podendo-se fazer alterações e ajustes localmente. No entanto, o manipulador robótico tem de ser retirado de produção.

O Anexo A possui um estudo efetuado a três consolas de programação de robôs.

Vantagens e desvantagens da programação *online*

Durante a programação *online*, o operador tem a liberdade para se movimentar na célula de robótica, de modo a obter a melhor posição para visualizar o manipulador robótico. Esta

³Consola de programação do robô.

programação não requer um nível de especialização elevado, fazendo com que os operadores mais familiarizados com os processos da célula de robótica possam realizar a programação do robô (A.K. Gupta, 2016).

Em relação a desvantagens, este método de programação possui as seguintes (A.K. Gupta, 2016):

1. a produção tem de ser parada para se realizar a programação;
2. a movimentação do manipulador robótico durante a programação é lenta;
3. a programação da lógica é mais complicada que na programação *offline*;
4. esta programação é ineficiente em FMS.

3.1.3 Comparação entre ambos os métodos de programação descritos

A programação *online* é uma tarefa mais demorada que a *offline*, sendo que se torna muito complicada com o aumento da complexidade das células robotizadas. Com a programação *online*, o manipulador robótico tem de ser retirado de produção, diminuindo a utilidade do robô e pondo em causa o retorno financeiro relativo à sua compra (A.K. Gupta, 2016).

A programação *online* é bastante acessível, dado que o manipulador robótico é programado em concordância com a posição real, não havendo os erros relativos à precisão dos objetos que ocorrem na programação *offline*.

3.2 *Software de programação offline da ABB*

O RobotStudio é o *software* de programação *offline* da ABB, tendo sido desenvolvido no ABB *Virtual Controller*, que é uma cópia exata do *software* dos manipuladores robóticos e controladores reais. A linguagem utilizada neste *software* é o RAPID. Este programa utiliza os ficheiros de configuração reais do controlador e robô, permitindo uma transferência dos programas desenvolvidos no computador para a realidade (Low, 2007).

O RobotStudio fornece as ferramentas necessárias para aumentar a rentabilidade dos sistemas robóticos, permitindo aos programadores treinar e melhorar soluções sem perturbar a produção. Este *software* permite confirmar soluções antes de se instalarem os manipuladores nas células (Low, 2007; Brell-Çokcan and Braumann, 2013).

O RobotStudio possui uma opção designada de *AutoPath*, permitindo, após marcação dos pontos de uma trajetória, definir automaticamente as configurações das juntas do manipulador robótico. Este *software* oferece a possibilidade de se utilizar um *Teach Pendant* virtual semelhante ao real, podendo ser utilizado, por exemplo, para testar mensagens programadas para aparecer no ecrã da consola. O RobotStudio possui, também, pacotes designados por PowerPacs, que são utilizados em certas aplicações.

Este *software* de programação *offline* da ABB contém uma opção de programação designada por *SoftMove*, que consiste na diminuição da rigidez do manipulador robótico numa direção cartesiana específica, mantendo o comportamento inicial em todas as outras direções, ou seja, existe complacência em apenas uma direção. Isto demonstra ser útil em certas ocasiões, como por exemplo, quando é necessário uma máquina realizar uma força no robô sem existir colisão (ABB, 2008).

3.2.1 Machine Tending PowerPac

Este PowerPac trabalha em conjunto com o *software* RobotWare Machine Tending da ABB, fornecendo diversas opções, tais como processos de máquinas de injeção e uma biblioteca que contém máquinas e *grippers*, inserindo flexibilidade na programação das células (ABB, 2012).

O RobotWare Machine Tending fornece uma interface gráfica intuitiva, no FlexPendant, que pode ser customizada de acordo com as necessidades e preferências do programador. A Tabela 3.1 apresenta as características do PowerPac de *machine tending*.

Tabela 3.1: Características do PowerPac de *machine tending* (ABB, 2012).

Definição das peças e <i>grippers</i>	- Definir e configurar peças e <i>grippers</i> a utilizar na célula, podendo estes ser criados ou escolhidos da biblioteca existente - Criação de sinais
Definição de estações	- Definir e configurar estações da célula, podendo ser criadas ou selecionadas a partir da biblioteca existente
Definição de movimentos entre estações	- Criar trajetórias do robô entre estações
Definição do <i>HomeRun</i>	- Definir uma trajetória que permita mover o robô para a posição inicial, de maneira segura, se ocorrer algum erro
Definição de ciclos	- Definir ciclos de produção e a sua lógica
Simulação, validação e otimização	- Simular o programa desenvolvido, validar a movimentação do robô e otimizar os seus movimentos para reduzir o tempo de ciclo
Implementação e documentação	- Descarregar o programa para o controlador do robô - Documentação do projeto é gerada automaticamente

3.2.2 Linguagem de programação RAPID

A linguagem de programação RAPID é utilizada nos manipuladores robóticos da empresa ABB. Esta linguagem contém certos módulos, rotinas e instruções que permitem descrever as tarefas do robô numa sintaxe semelhante à linguagem de programação Pascal. Existem instruções específicas para diversos comandos, tais como movimentar o manipulador ou ativar sinais digitais ou analógicos. Esta linguagem possui três tipos de rotinas (procedimentos, funções e rotinas de interrupção), três tipos de dados (constantes, variáveis e persistentes) e três tipos de expressões (aritméticas, lógicas e *string*) (Ge and Yin, 2007).

O RAPID é uma linguagem com uma sintaxe complexa, fazendo com que a sua aprendizagem, por parte dos operadores das fábricas, não seja muito simples. No entanto, esta linguagem é interpretativa, sendo orientada ao processo. À medida que o programa do manipulador robótico aumenta de tamanho, a complexidade deste aumenta exponencialmente. Linguagens orientadas ao objeto apresentam mais vantagens quando o código do programa é longo, comparativamente com linguagens orientadas ao processo.

3.3 Redes de comunicação industrial

A introdução de redes de comunicação industrial teve um impacto profundo na automação, especialmente os sistemas *fieldbus*, desenvolvidos para os níveis mais baixos da automação. Estas redes aumentaram a flexibilidade e desempenho dos sistemas em todas as áreas de aplicação. Um sistema *fieldbus* é uma comunicação digital, bidirecional e multiponto entre dispositivos de controlo. Tem a função de *Local Area Network* (LAN) para processos de controlo avançados, entradas e saídas remotas e aplicações de automação de alta velocidade (Sauter, 2014).

A pirâmide das redes na automação, ilustrada na Figura 3.2, teve um papel importante no desenvolvimento do *fieldbus*. Esta pirâmide foi definida para estruturar o fluxo de informação necessário nos processos de automação de uma fábrica. Este modelo está dividido em cinco níveis, sendo que as redes de campo foram desenvolvidas de modo a melhorar o fluxo da informação. Nesta pirâmide, o sistema *fieldbus* encontra-se em dois níveis: o nível de campo (*field*) e o nível dos processos e da célula.

A pirâmide tem como nível mais elevado a *Global Area Network* (GAN), que é utilizada para longas distâncias (intercontinentais). No segundo nível encontra-se a *Wide Area Network* (WAN), associada às redes telefónicas. De seguida, aparece a rede LAN, com a tecnologia Ethernet em destaque. Esta rede é utilizada para automação de escritório e cobre distâncias curtas. É também de salientar que atualmente a *Internet* encontra-se presente nestes três tipos de rede.

A tecnologia Ethernet, da rede LAN, está a tornar-se cada vez mais popular na automação, podendo vir a substituir diversos sistemas *fieldbus* utilizados atualmente, introduzindo-se a rede LAN em aplicações de controlo de baixo nível. Desta forma, no futuro, a pirâmide

poderá ser formada por apenas dois a três níveis.

A *Field Area Network* (FAN) e a rede LAN podem ser distinguidas de acordo com as suas funcionalidades e áreas de aplicação. Os sistemas *fieldbus* são utilizados em automação, independentemente da topologia utilizada, taxa de dados ou protocolos, enquanto que a rede LAN é utilizada nas áreas de escritório.

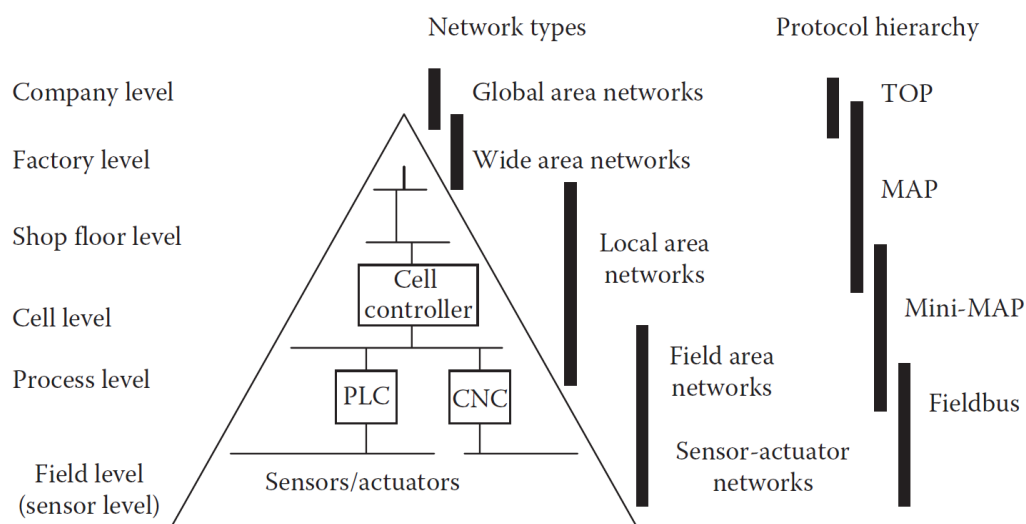


Figura 3.2: Pirâmide das redes de comunicação na automação (Sauter, 2014).

3.3.1 PROFIBUS

O PROFIBUS é um sistema de comunicação utilizado maioritariamente nas áreas de automação de fábricas e processos, transporte e distribuição de energia. Este sistema é adequado para aplicações com necessidade de processamento rápido e com comunicações complexas. O PROFIBUS encontra-se padronizado, assegurando a comunicação entre dispositivos de diversos fabricantes (Jecht et al., 2014).

Este sistema é líder mundial no mercado de redes FAN apresentando, em 2014, mais de 20% de quota de mercado, correspondendo a cerca de um milhão de instalações equipadas com PROFIBUS e mais de 50 milhões de nós.

O PROFIBUS possui uma estrutura modular que oferece diversas tecnologias de transmissão e comunicação. Assim, este sistema consegue abranger diversas especificações dos processos de automação, tanto de aplicações simples como complexas, bastando apenas seleccionar os componentes adequados da sua *toolbox*.

Um exemplo de uma das tecnologias de transmissão do PROFIBUS é a camada física EIA/TIA-485, que contém uma boa imunidade ao ruído, permite percorrer longas distâncias, incluir até 32 dispositivos num segmento e transmitir dados até 12 Mbit/s.

3.3.2 Ethernet

As redes de controlo em automação industrial têm vindo a aumentar em complexidade, com o aumento do número de componentes de controlo, atuadores e sensores. No futuro, as comunicações industriais poderão realizar-se em redes Ethernet baratas que preencham os requisitos da automação. Esta tecnologia pode substituir os sistemas *fieldbus*, apresentando as vantagens seguintes: transmissão de dados 10 a 100 vezes mais rápida que as soluções *fieldbus*; utilização de componentes padrão, como cablagem de cobre de categoria cinco; implementações consistentes que se estendem do escritório para as células automatizadas (Hibbard et al., 2014).

A Ethernet é uma plataforma de comunicação essencial em sistemas automatizados. Apesar dos sistemas *fieldbus* ainda serem muito utilizados, o desenvolvimento das tecnologias de comunicação em automação está direcionado para a Ethernet. Este sistema de comunicação permite a utilização de diversos protocolos na mesma rede, em simultâneo, sendo flexível e escalável (Prytz et al., 2014).

3.3.2.1 PROFINET

O PROFINET é um sistema de comunicação baseado em Ethernet que cobre todos os requisitos na automação. Com este sistema desenvolvem-se soluções para produção discreta, processos de automação contínuos e aplicações de segurança. O PROFINET possibilita a integração de sistemas já existentes, como o PROFIBUS, não sendo necessária qualquer alteração de configuração (Wenzel, 2014).

A arquitetura do PROFINET é modular, possibilitando aos utilizadores a escolha das funcionalidades pretendidas, principalmente em termos de troca de dados. O PROFINET permite, ainda, que a informação de processos e alarmes seja transmitida em tempo real (o sistema processa eventos externos dentro dum tempo definido), sendo que a troca de dados é realizada em ciclos de, no máximo, 1 ms (Pigan and Metter, 2008; Wenzel, 2014).

O PROFINET fornece diversas aplicações úteis, como a visualização da topologia da rede e informações relativas ao estado dos dispositivos do sistema. Possui, também, a tecnologia de segurança PROFI-safe, que permite o uso do mesmo tipo de cablagem utilizado nas comunicações padrão (Wenzel, 2014).

A configuração das Entradas e Saídas (E/S) do PROFINET é semelhante ao PROFIBUS. Relativamente a essa configuração, existem as classes seguintes (Wenzel, 2014):

1. controlador: o PLC onde o programa se encontra, podendo ser comparado com o *master* de classe um do PROFIBUS. Esta classe fornece dados das saídas dos dispositivos configurados e recebe os seus dados das entradas;
2. dispositivos: um dispositivo presente na rede ligado a um, ou mais, controladores na rede PROFINET. Pode ser comparado com a função do *slave* do PROFIBUS. Os dispositivos fornecem informação das entradas e recebem informação das saídas;

3. supervisor: pode ser um dispositivo de programação, um PC ou um HMI, para realizar diagnósticos, correspondendo ao *master* de classe dois do PROFIBUS.

A Tabela 3.2 apresenta algumas diferenças entre as características do PROFINET e do PROFIBUS, sendo de salientar a diferença significativa entre as taxas de transmissão e o número de estações. Relativamente à importação de dados dos dispositivos, o PROFIBUS fornece um ficheiro *General Station Description* (GSD) em *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII), e o PROFINET fornece um ficheiro GSD em *eXtensible Markup Language* (XML) (Pigan and Metter, 2008).

Tabela 3.2: Comparação das características de PROFINET e PROFIBUS (Pigan and Metter, 2008).

Características	PROFINET	PROFIBUS
Taxa de transmissão	100 Mbit/s	No máximo 12 Mbit/s
Número de estações	Definido pela classe da rede	No máximo 126
Importação de dados dos dispositivos	Em formato XML	Em formato ASCII
Ficheiro GSD	Descrição de diversos dispositivos	Descrição de um dispositivo
Dispositivo <i>host</i>	Controlador	<i>Master</i> de classe um
	Supervisor	<i>Master</i> de classe dois
Dispositivo subordinado	Dispositivo	<i>Slave</i>
Endereço de rede	Endereço IP	Endereço PROFIBUS

3.4 Conclusão do capítulo

Este capítulo aborda conceitos relativos à programação de manipuladores robóticos e às redes de comunicação industrial onde estes são inseridos.

Primeiramente, realizou-se uma pesquisa sobre métodos de programação de robôs, tais como o *offline* e *online*. Foi, também, efetuada uma pesquisa sobre o *software* de programação *offline* da ABB e qual a linguagem utilizada. Para finalizar, descreveu-se sumariamente as redes industriais e foram apresentados alguns exemplos.

Conclui-se, portanto, que, com o avanço da tecnologia, a robótica vai apostar cada vez mais no desenvolvimento de soluções utilizando-se métodos de programação *offline*, visto que a sua utilização diminui o tempo de inatividade do manipulador industrial, porque permite efetuar a programação, configuração, testes e definição de trajetórias com a utilização de um *software offline* próprio. Para esta realidade poder acontecer, as empresas têm, também, de aumentar o seu planeamento e organização no que diz respeito ao desenvolvimento das células de robótica no ambiente *offline*, porque sem estes fatores, quando

se realizar a transferência do programa desenvolvido para o controlador real, irão existir muitas incoerências, retirando utilidade ao programa *offline*.

Relativamente às redes de comunicação industrial estudadas, depreende-se que o PROFINET apresenta diversas vantagens comparativamente ao PROFIBUS, aumentando a eficiência das linhas de produção onde é utilizado. O PROFINET pode, até, integrar-se em sistemas existentes sem ser necessária uma nova configuração.

Capítulo 4

Robótica na indústria da fundição

O ambiente de trabalho é uma das principais características a ter em conta quando se pretende implementar sistemas robóticos. A indústria da fundição apresenta uma atmosfera prejudicial para os seres humanos, sobretudo devido ao calor e aos fumos emitidos durante os processos realizados. Os operadores humanos que realizem processos que envolvam folhas de metal estão em risco devido ao funcionamento das prensas utilizadas neste tipo de indústria. Assim, tornou-se necessário e lógico utilizar manipuladores robóticos neste tipo de ambientes em substituição dos trabalhadores. Sendo assim, uma das primeiras instalações de robôs industriais foi numa indústria deste tipo, por volta de 1961 (Groover, 2007).

A indústria de formação de metal começou por implementar os seus sistemas de produção através de equipamentos de automação projetados especificamente para realizar uma determinada tarefa. Atualmente, ocorreu uma transição desse tipo de automação para uma mais flexível, com a utilização de manipuladores robóticos (Platzer et al., 2013).

Neste capítulo vão ser abordados temas importantes da robótica na indústria da fundição e na área de *machine tending*. Apresenta-se uma pesquisa relativa à indústria automável. Vão ser, também, apresentados diversos casos de estudo que permitem obter um conhecimento mais aprofundado relativamente ao assunto desta dissertação.

4.1 Aplicações de manuseamento de materiais

Uma das áreas onde se utiliza frequentemente robótica são aplicações de manuseamento de materiais, também designadas por *machine tending*. Um exemplo comum de um processo de *machine tending* é o robô retirar uma peça, que foi produzida por uma máquina, e colocá-la no local pretendido na célula de robótica (Li and Huang, 2008; Portelli, 2003).

Nestas aplicações existem três casos possíveis (Groover, 2007):

1. carregamento da peça na máquina: o robô introduz a peça na máquina, mas a mesma é retirada por outro meio;

2. descarregamento da peça da máquina: o material que vai gerar a peça é carregado para a máquina, sendo que o robô retira a peça final da mesma;
3. carregamento e descarregamento da peça da máquina: o robô coloca o material que vai gerar a peça na máquina e retira-a.

Aplicações de robótica de *machine tending* relevantes para esta dissertação são (Groover, 2007):

1. fundição: o robô retira a peça da máquina de injeção de alumínio, realizando, de seguida, outros processos, tais como inserir a peça num tanque de água para a arrefecer;
2. prensagem: O robô insere a peça na prensa, ocorrendo, de seguida, a prensagem. Depois disto, a peça é colocada num contentor.

4.2 Fundição na robótica

O equipamento mais importante numa célula de robótica que envolva fundição é a máquina de injeção. Apesar disso, esta máquina necessita de um conjunto de equipamentos periféricos que trabalhem em conjunto com a mesma. Uma máquina de injeção de alumínio pode dividir-se em três componentes principais: o grupo das bombas ou unidade de potência, a unidade de fixação e o sistema de injeção (Heinemann, 2016).

O grupo das bombas fornece a pressão hidráulica necessária para operar as partes que necessitam de ser movidas na máquina injetora de alumínio. Um motor elétrico fornece energia às bombas que comprimem os fluidos hidráulicos com uma pressão entre 160 e 2010 bar.

A unidade de fixação desloca-se e fecha o molde, sendo que o prato móvel move-se ao longo da base da máquina. Existem outras operações opcionais de fundição controladas hidraulicamente. Existem, também, as unidades de repressão e ejetores.

A principal função do sistema de injeção é movimentar o pistão, que espreme o metal líquido para dentro da cavidade do molde de fundição. Este sistema garante uma entrada suave do metal dentro da cavidade do molde, um preenchimento rápido do molde e uma pressão suficiente enquanto o metal está a solidificar. O movimento do pistão controla o sistema dos ejetores quando a peça formada é retirada do molde.

A Figura 4.1 ilustra uma máquina injetora de fundição com uma unidade de fixação com pratos duplos.

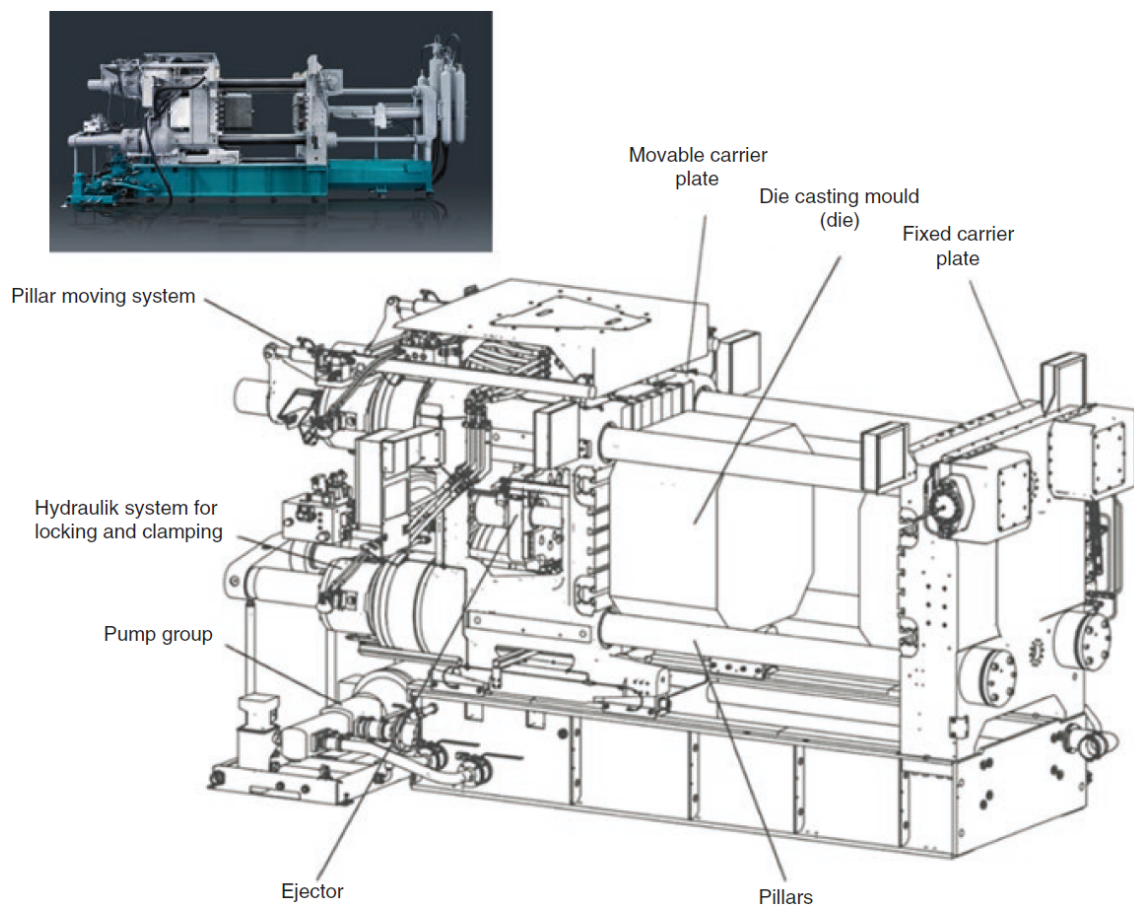


Figura 4.1: Máquina injetora de fundição com pratos duplos (Heinemann, 2016).

4.2.1 Sequência do processo de formação da peça

Na primeira fase deste processo, o metal líquido é forçado, através de muita pressão, para dentro das cavidades do molde que irá formar a peça. O enchimento da cavidade pelo metal líquido é feito através de um pistão com um nível de pressão de cerca de 1200 bar. Devido a isto, a máquina injetora tem de aplicar forças de cerca de dezenas de milhares de Newton para compensar. Apesar das elevadas pressões e temperaturas a que o molde de aço está sujeito, este consegue realizar até cerca de 300 000 ciclos do processo de fundição (Heinemann, 2016).

Como demonstra a Figura 4.2, cada ciclo de formação da peça segue o seguinte processo (Heinemann, 2016):

1. quando ambos os moldes (fixo e móvel) fecham, o metal líquido é colocado numa câmara;
2. o pistão força o metal para dentro da cavidade do molde;
3. dentro da cavidade, o metal líquido solidifica, sendo que o pistão mantém o metal sob pressão durante o tempo necessário;

4. quando a solidificação termina, ocorre a abertura dos moldes para que a peça possa ser retirada pelo manipulador robótico e o pistão retorna à sua posição inicial.

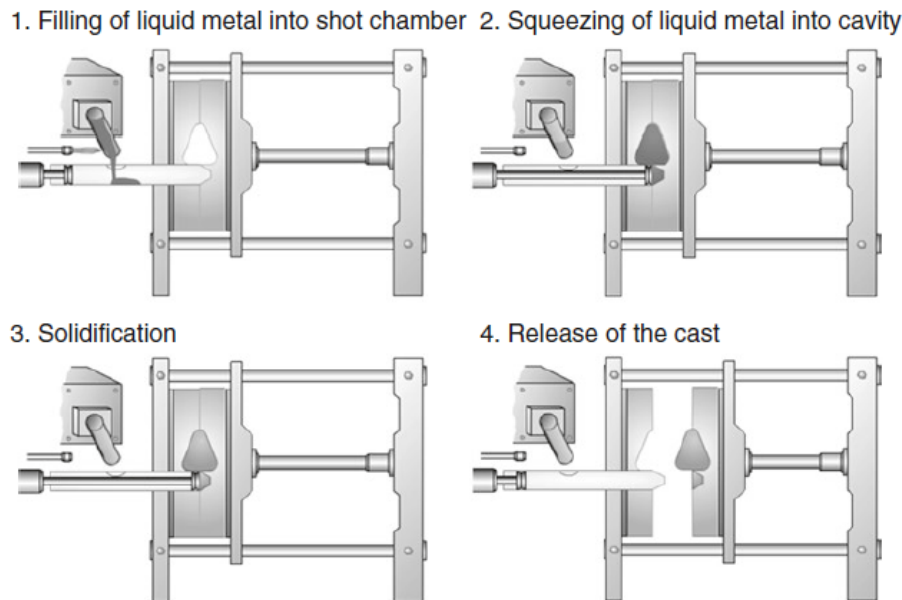


Figura 4.2: Processo de formação da peça na máquina injetora ([Heinemann, 2016](#)).

Para a máquina injetora estar pronta para um novo ciclo, realiza-se a lubrificação dos moldes.

4.2.2 Funcionamento da célula com o robô

Uma célula de robótica com uma máquina de injeção de alumínio é complementada pelos seguintes equipamentos ([Heinemann, 2016](#)):

1. forno de espera: controla a temperatura do metal líquido na célula, introduzindo-o na máquina injetora;
2. molde de fundição: define qual a forma da peça formada (sendo o seu negativo);
3. unidades de temperatura: controlam a temperatura dos moldes da máquina, garantindo o tempo suficiente para o metal solidificar;
4. robô extrator: manipulador robótico que extrai peça do molde, transferindo-a para o próximo passo;
5. dispositivo de corte: prensa que remove os excessos da peça produzida;
6. robô lubrificador: manipulador robótico que lubrifica o molde;
7. tanque de água: a peça é arrefecida através deste tanque.

A Figura 4.3 ilustra uma célula de robótica de fundição com os equipamentos referidos acima. Esta figura demonstra, também, uma célula real, similar à esquemática.

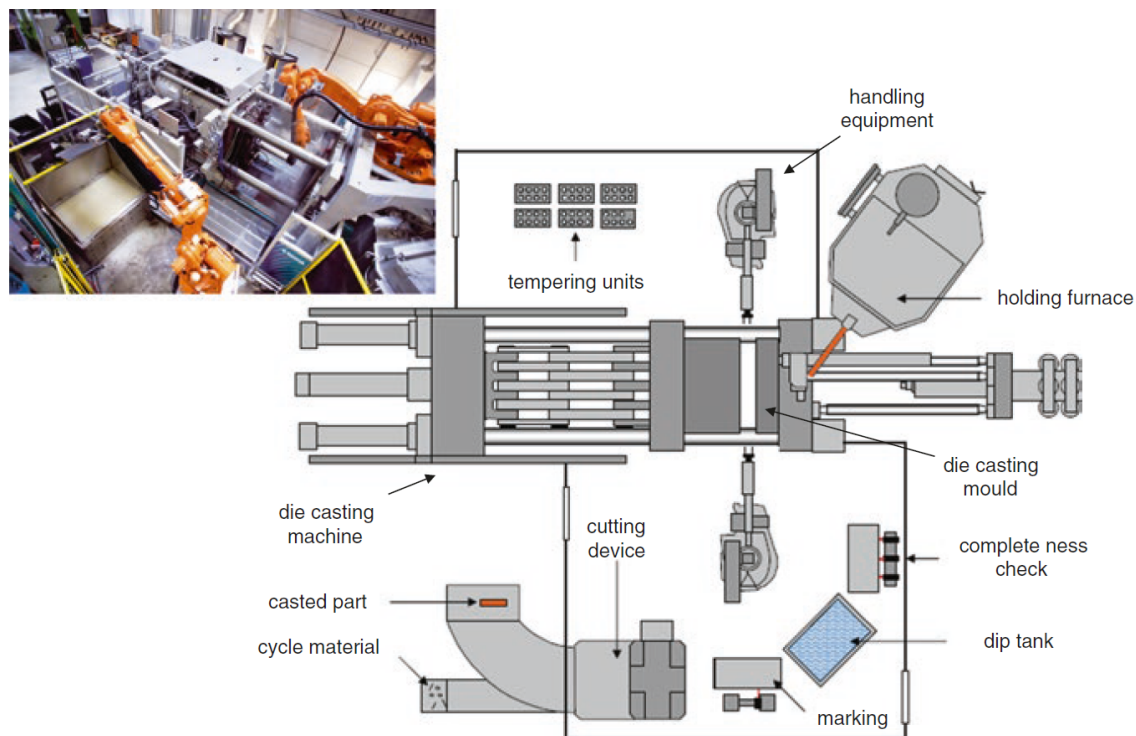


Figura 4.3: Célula de robótica na fundição (Heinemann, 2016).

4.2.3 Segurança na indústria da fundição

Historicamente, a injeção de alumínio não demonstrou um nível de segurança aceitável quando comparado a outras indústrias de metais, devido ao ambiente adverso (muito quente, sujo, muito fumo, húmido, barulhento e perigoso) que este tipo de aplicação gera. Usualmente, recomenda-se a utilização de óculos de proteção, tampões para os ouvidos, botas de biqueira de aço e um capacete (Andresen, 2004).

As fábricas produtoras de peças de alumínio a alta pressão possuem padrões que certificam que existem os procedimentos de segurança necessários. Esses documentos indicam requisitos de segurança para equipamentos, tanto dos fornecedores como das fábricas produtoras, identificando e quantificando possíveis riscos de segurança associados com as máquinas de fundição e equipamentos auxiliares.

Todo o equipamento que envolva o metal que esteja a ser produzido é demasiado quente para ser tocado sem provocar danos sérios no operador, portanto é necessário seguir todas as medidas de segurança implementadas. É, também, essencial ter as precauções necessárias quando se realiza a manutenção do equipamento de automação.

A identificação de potenciais perigos e a sinalização de avisos é essencial na prevenção de acidentes, sendo que têm de ser realizadas de maneira a que os operadores e técnicos consigam compreender facilmente.

Os perigos relacionados com o calor são frequentes neste tipo de indústria, sendo necessário conhecer os locais onde normalmente ocorrem. Fusão de metais, mesmo estando na categoria de temperaturas baixas (derrete abaixo de 1093°C), pode causar queimaduras de terceiro grau, porque o metal durante a produção encontra-se sempre no seu estado líquido.

Quando os dois moldes que formam a peça se separam podem soltar partes do metal líquido a alta velocidade, podendo queimar qualquer pessoa que esteja na zona. Todos os operadores e visitantes da célula de fundição têm de ser informados relativamente a este perigo. Para evitar que este fenómeno ocorra, a máquina injetora pode conter portas que se encontram fechadas no momento de abertura dos moldes.

As superfícies envolvidas na fundição são perigosas porque as temperaturas a que se encontram ($200\text{--}260^{\circ}\text{C}$) são invisíveis. Para uma pessoa conseguir reconhecer o perigo deste calor invisível tem de estar treinada e ter um certo nível de experiência na área.

Mesmo sendo impossível eliminar todos os perigos na fundição, pode reduzir-se o risco que os operadores correm quando trabalham nestas condições, através de, por exemplo, formação sobre práticas de segurança. Portanto, qualquer empresa desta área deve investir em programas de segurança e prevenção de acidentes.

4.3 Indústria automóvel

A indústria que mais utiliza robôs industriais é a automóvel. A competitividade elevada desta indústria origina a necessidade de estar constantemente a melhorar os processos de produção.

Atualmente, na indústria automóvel, não há processos de produção sem automação, por um lado, pela necessidade de aumentar continuamente a produção, por causa do aumento da procura, e, por outro, pela variedade da oferta deste produto. Devido à competitividade deste mercado, as produções devem ser flexíveis para que, em caso de necessidade, se possa proceder a alterações. Flexibilidade da produção na indústria automóvel é, também, importante para reduzir o tempo de ciclo do fabrico de veículos, visto que hoje em dia há mais variedade ([Karabegović, 2017](#)).

4.3.1 Alumínio na indústria automóvel

A indústria automóvel está a apostar na utilização de alumínio no fabrico de peças para veículos, de modo a conseguir uma redução do seu peso sem afetar a sua durabilidade. Nos Estados Unidos da América (EUA), a indústria está sob pressão constante em relação a este tema da redução do peso devido a normas como o *The Corporate Average Fuel Economy* (CAFE) da *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA), que controlam qual a distância que os veículos devem efetuar por galão de combustível ([NHTSA, 2018](#)).

Os fabricantes têm substituído cada vez mais peças de aço por alumínio e, neste momento, um automóvel já contém uma quantidade de alumínio considerável. A Figura 4.4,

da empresa produtora de alumínio Alcoa, mostra a quantidade de alumínio presente num automóvel em 2017 (azul escuro) e a quantidade adicional que possuirá em 2025 (azul claro) (CFS, 2017).

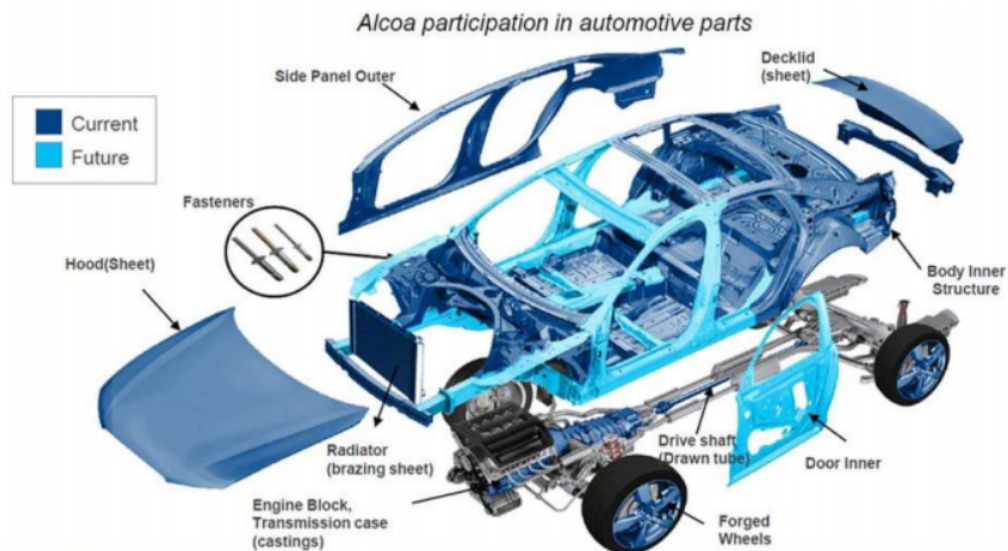


Figura 4.4: Peças de alumínio num automóvel (CFS, 2017).

A Audi tem fabricado estruturas totalmente compostas por alumínio para o seu modelo A8 já há cerca de 20 anos, e cada vez mais empresas estão a implementar este conceito. A Ford, por exemplo, está a desenvolver esta ideia no seu modelo F-150, que é o carro mais vendido na América do Norte (Boudette, 2018).

Alterando a estrutura de metal para alumínio, estima-se que o peso do carro diminua cerca de 317 kg, ou 15% do seu peso atual, o que iria aumentar a poupança de combustível em aproximadamente 25% (CFS, 2017). Com a redução do peso do veículo, torna-se, também, possível utilizar um motor menos potente (Boudette, 2018).

Um contratempo que a Ford encontrou foi o facto do preço dos combustíveis nos EUA não ser um fator considerável para quem conduz o modelo F-150. Adicionalmente, o preço do alumínio começou a subir. Em 2017, o lucro da empresa na América do Norte caiu 17%, em parte devido à subida de preço do alumínio e do aço. Apesar disto, a utilização deste material aumentou a capacidade de transporte de material no veículo, sendo essa a principal razão da compra deste automóvel.

A troca de aço para alumínio torna necessária a troca dos sistemas de produção, porque as máquinas *standard* utilizam ímanes que servem para pegar nas peças de aço. Para as peças de alumínio são utilizados sistemas que funcionam através de sucção (Boudette, 2018).

4.4 Casos de Estudo

Nesta secção apresentam-se casos de estudo que permitem perceber como foram desenvolvidas diversas aplicações de *machine tending* e fundição, aprofundando o conhecimento do assunto.

4.4.1 Aplicação geral de robótica para *machine tending*

Cada vez mais se utilizam manipuladores industriais em indústrias de fabrico de plástico e fundição. Por conseguinte, uma aplicação de robótica simples de programar e operar é muito procurada pelas empresas e clientes que fornecem este tipo de serviço. Será útil a existência de uma arquitetura geral relativa a aplicações de *machine tending*, mesmo já existindo *software* específico para indústrias como a do plástico (Li and Huang, 2008).

Este caso de estudo propõe uma aplicação geral para a área de *machine tending* que poderá ser usada em aplicações que façam uso de máquinas de injeção. Esta solução torna mais simples a programação e operação do manipulador robótico, a integração entre este e a máquina de injeção, e a interação entre a programação *online* e *offline*.

4.4.1.1 Arquitetura da aplicação

A plataforma desta aplicação foi desenvolvida para simplificar a programação e operação das aplicações de robótica de *machine tending*, sendo que também permite uma flexibilidade relativa a alterações para casos mais complexos nesta área (Li and Huang, 2008).

A Figura 4.5 ilustra a arquitetura da aplicação desenvolvida neste caso de estudo. Como se pode observar, contém a aplicação do controlador, que é o núcleo de toda a arquitetura, sendo a base da programação e operação do robô. A aplicação do *Teach Pendant* é a interface gráfica do utilizador para programar e operar o manipulador robótico.

A aplicação de computador é a ferramenta utilizada para a programação *offline*, fornecendo o ambiente de simulação dos processos de *machine tending*. Possui, também, uma HMI da máquina que permite a comunicação do operador com o controlador do manipulador robótico.

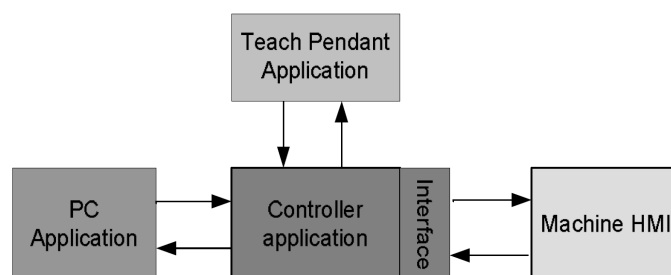


Figura 4.5: Arquitetura da aplicação (Li and Huang, 2008).

4.4.1.2 Conceito geral da aplicação

O processo de *machine tending* varia dependendo dos seus requerimentos específicos. Existem diferentes processos, tais como a remoção da peça da máquina injetora e colocação desta numa prensa ou numa rampa de qualidade, sendo que a aplicação irá conter todos os requisitos necessários para executar cada um destes processos na lógica de programação e movimentação do manipulador robótico (Li and Huang, 2008).

4.4.1.3 Programação e operação do robô

Esta solução apresenta uma programação e operação do robô simplificada, sendo uma das suas partes fundamentais. Para isto se tornar possível, esta aplicação apresenta diversos requisitos dos processos de *machine tending*, tornando-se fácil de utilizar e flexível. De seguida, descreve-se a solução (Li and Huang, 2008).

Requisitos dos processos

A aplicação geral tem de possuir cobertura dos requisitos dos diversos processos de *machine tending*. A existência de uma estrutura composta pela aplicação do controlador e do *Teach Pendant* permite essa cobertura, como se pode observar na Figura 4.6 (Li and Huang, 2008).

A aplicação do controlador possui diversos módulos: o *kernel*, a célula, a estação e a ferramenta constituem a parte principal. Estes módulos existem para construir uma base de trabalho comum para criar programas específicos para o robô.

A aplicação do *Teach Pendant* contém a interface de programação *online* e operação. Dependendo da estrutura da aplicação do controlador, a interface de programação, no *Teach Pendant*, fornece a abordagem para criar o programa, permitindo ao utilizador configurar os detalhes da implementação.

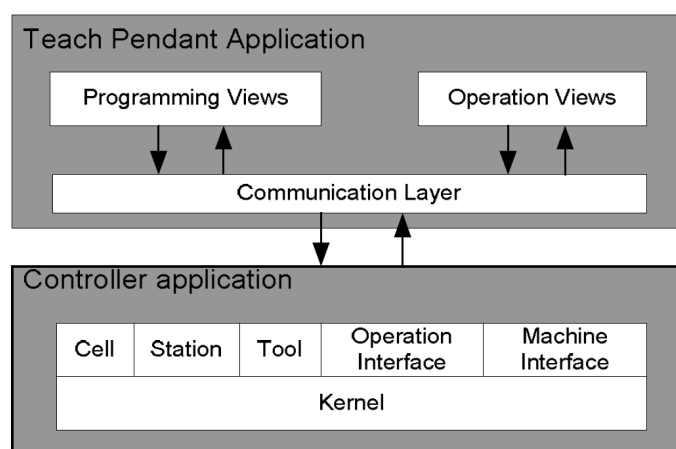


Figura 4.6: Estrutura da aplicação do controlador e *Teach Pendant* (Li and Huang, 2008).

Programação e operação simplificada

Nesta aplicação é essencial simplificar os detalhes complexos de uma célula de robótica de *machine tending*, tornando a programação e operação tarefas simples para o utilizador, facilitando o uso do manipulador robótico neste tipo de aplicações (Li and Huang, 2008).

1) Simplificação da programação do robô

Em relação à simplificação da programação do robô, esta aplicação não necessita de uma programação pura de linguagem de robótica, conseguindo, mesmo assim, resolver uma variedade de casos de *machine tending* (Li and Huang, 2008).

A base desta aplicação é um conjunto de módulos estruturados de forma a permitir a criação de módulos específicos de processos de *machine tending* durante a programação do manipulador robótico. A Figura 4.7 ilustra a estrutura dos módulos da aplicação do controlador, que são os seguintes (Li and Huang, 2008):

1. *kernel*: este módulo é o núcleo de toda a aplicação do controlador. É o responsável pela execução do programa, programação dos ciclos e das estações, controlo dos erros, monitorização dos estados de todas as estações e ferramentas, com a utilização de rotinas dentro do *kernel*, ou rotinas definidas noutros módulos (a rotina de execução da estação dentro do módulo da estação). O módulo do *kernel* está interligado com todos os outros;
2. célula: o módulo da célula contém a informação relativa à célula de robótica que vai ser usada pelo módulo *kernel*;
3. estação: este módulo descreve objetos reais da estação de trabalho. Consiste nas trajetórias do manipulador robótico, interrupções e as suas rotinas de resposta e métodos das ferramentas. Este módulo depende do módulo das ferramentas;
4. ferramenta: este módulo descreve a ferramenta. Consiste na informação da ferramenta e nas suas interfaces de operação chamadas pelos módulos da estação e *kernel*;
5. interface de operação: este módulo fornece a interface de operação do manipulador robótico, chamada pelo *Teach Pendant*, quando a célula está em produção;
6. interface da máquina: este módulo define as entradas e saídas necessárias ao funcionamento do robô e a interface de integração entre o robô e a máquina.

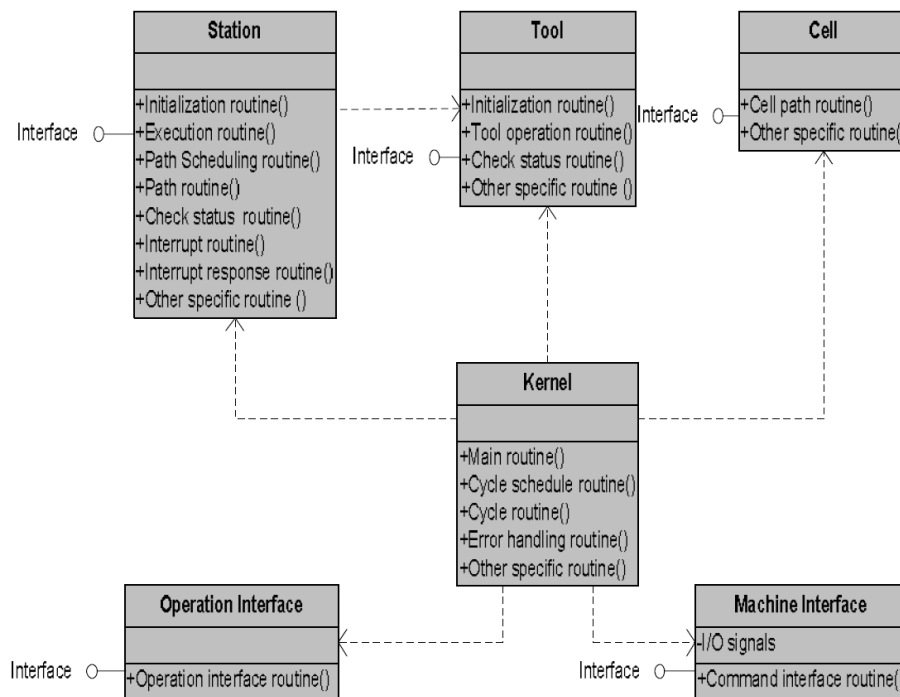


Figura 4.7: Estrutura da aplicação do controlador (Li and Huang, 2008).

O *Teach Pendant* fornece vistas de programação, na interface gráfica, para a programação do manipulador robótico. Assim, os procedimentos de modificar ou criar um programa (definição do processo, criação das trajetórias do robô e configuração da ferramenta) são implementados através de um assistente de programação que vai guiar o utilizador durante o processo de criação do programa, seguindo os seguintes passos (Li and Huang, 2008):

1. configuração da célula: definem-se os componentes da célula e configura-se o *layout*;
2. configuração do ciclo: define-se e configura-se a lógica do ciclo através de uma vista em árvore;
3. configuração da ferramenta: mapeamento dos sinais e configuração da ferramenta;
4. configuração da estação: definição de trajetórias do manipulador robótico numa estação ou entre estações; configuração da lógica da movimentação (acoplamento de uma ferramenta; ordenação dos pontos que compõem a trajetória).

O mapeamento entre o controlador e o *Teach Pendant* é realizado de forma simples. Assim, a aplicação do *Teach Pendant* pode criar ou modificar informação específica do programa de acordo com a estrutura dos módulos.

2) Simplificação da operação do robô

Em relação à simplificação da operação do manipulador robótico, esta aplicação propõe a seguinte solução (Li and Huang, 2008):

1. o controlador fornece a interface de operação demonstrada na Figura 4.6, que irá ser chamada pelo *Teach Pendant*;
2. como demonstra a Figura 4.6, o *Teach Pendant* fornece uma série de vistas de operação;
3. são fornecidas as seguintes vistas de operação: carregar e descarregar o programa do robô, ciclos de operação (como iniciar e parar) durante a produção; ciclo de retorno à posição de *home*; informações relativas à produção e o estado dos sinais utilizados.

Flexibilidade

Esta aplicação não só permite programar diversos casos de *machine tending* de forma simples, com as interfaces gráficas fornecidas pelo controlador e o *Teach Pendant*, mas também fornece uma flexibilidade ao programador, possibilitando a personalização dos módulos predefinidos, para criar um programa de robótica que consiga lidar com os requisitos de casos complexos na área de *machine tending* (Li and Huang, 2008).

A flexibilidade reflete-se nos seguintes aspetos (Li and Huang, 2008):

1. todos os módulos da aplicação do controlador são passíveis de alterações, ou seja, de personalização;
2. quando os requisitos do processo de *machine tending* não são suportados pela interface gráfica do *Teach Pendant*, o programador pode adaptar o programa do robô através da aplicação do *Teach Pendant*.

4.4.1.4 Integração entre robô e máquina

Existem aplicações nesta área de robótica em que o operador controla tanto o manipulador robótico, como a máquina injetora na mesma posição do posto de trabalho durante a produção. Muitos fabricantes e clientes procuram implementar este tipo de solução integrativa. A aplicação de *machine tending* demonstrada neste caso de estudo apresenta uma arquitetura que visa controlar o robô e a máquina através do painel de controlo da máquina (Li and Huang, 2008).

Estados dos processos e do controlador do robô

Para existir o controlo do manipulador robótico a partir da máquina, os estados do controlador (motores estarem ligados ou desligados e o robô se encontrar em automático ou manual) e os estados dos processos (o programa do robô estar em funcionamento ou

parado) têm de estar disponíveis na interface da máquina. Existe a pré-condição de ser possível o envio de comandos de controlo do robô a partir da máquina injetora (Li and Huang, 2008).

Relativamente ao controlador do manipulador robótico, tem de ser possível, a partir da máquina, controlar os seguintes estados (Li and Huang, 2008):

1. o modo de operação do robô, tais como o automático e o manual;
2. o estado dos motores do robô (se está ligado ou desligado);
3. o controlador do robô estar em modo de produção;
4. o controlador do robô parar a execução do modo de produção devido a um comando de paragem ou ativação de uma emergência.

Em relação aos estados dos processos do robô, tem de ser possível, a partir da máquina, controlar os seguintes estados (Li and Huang, 2008):

1. modo de controlo do robô: o manipulador é controlado localmente ou remotamente;
2. programa do robô em execução: o programa do manipulador está em execução;
3. paragem do programa do robô: a execução do programa é interrompida;
4. robô retorna à posição de *home*: o manipulador robótico retorna à posição inicial do ciclo;
5. posição de *home* do robô: o manipulador encontra-se na posição inicial;
6. ciclo do robô ativo: o manipulador está a realizar um ciclo em cooperação com a máquina;
7. modo de interação do robô: o manipulador encontra-se, ou não, em funcionamento juntamente com a máquina.

Informação do programa do robô

Os nomes e os dados dos programas do robô devem ser acessíveis na máquina. Um operador tem de ter a possibilidade de escolher e carregar um programa do manipulador robótico através do seu nome ou número (Li and Huang, 2008).

4.4.1.5 Interação entre programação *online* e *offline*

Como demonstra a Figura 4.5, o controlador e o *Teach Pendant* desenvolvem o ambiente da programação *online*, sendo que a aplicação de computador desenvolve todos os processos *offline*, tais como o ambiente de simulação e os processos de *machine tending*. A interação entre os dois tipos de programação é essencial para existir uma maior facilidade

de programação do manipulador robótico (Li and Huang, 2008).

Interação entre programas

Os módulos da aplicação do controlador e do computador contêm a mesma arquitetura demonstrada na Figura 4.7, fazendo com que os programas criados tanto *online* como *offline* possuam a mesma estrutura. Deste modo, a interação entre ambas as programações torna-se simplificada (Li and Huang, 2008).

Abordagem de implementação da interação

A interação entre ambas as programações vai focar-se em três aspetos. O primeiro aspeto foca-se em melhorar a eficiência da programação *online*. Para isto, a aplicação do computador desenvolve o ambiente de simulação da célula de *machine tending*, fazendo com que o programador possa desenvolver a solução *offline* e, de seguida, descarregá-la para o controlador do manipulador robótico e completá-la através da programação *online* (Li and Huang, 2008).

O segundo aspeto baseia-se em simplificar o teste do programa, visto que este procedimento consome tempo e depende de todo o equipamento da célula de robótica. A aplicação do computador fornece o ambiente de simulação *offline* que permite ao programador carregar o programa que se encontra no controlador e descarregá-lo na aplicação para o testar facilmente.

O terceiro aspeto foca-se na simulação e teste de erros, sendo que isto é um procedimento complicado através de programação *online*. Como esta aplicação de *machine tending* oferece uma interface para programação *offline*, a simulação e teste de erros podem ser realizadas através da mesma. Para isto, o programador carrega o programa que se encontra no controlador para a aplicação do computador e realiza este procedimento no ambiente *offline*.

4.4.1.6 Conclusão do caso de estudo

Com esta aplicação torna-se mais simples a implementação de células robotizadas em indústrias, como a fundição, que utilizam processos de *machine tending*. A forma como se encontra estruturada permite aos utilizadores realizarem uma programação e operação do robô simplificada.

É, também, essencial, em processos de *machine tending*, existir integração entre o manipulador industrial e a máquina utilizada na célula de robótica, sendo que esta aplicação fornece essa condição. Com o avanço do tempo, a programação *offline* é cada vez mais utilizada, sendo, por isso, fulcral existir uma interação entre essa programação e a *online*.

4.4.2 Solução de robótica na fundição utilizando robôs da ABB

A empresa Artimpianti foi fundada por Alberto Botta e Walter Genre em 1984. Com o passar do tempo, a empresa focou-se na indústria da fundição, com o objetivo de introduzir conceitos de automação modernos adaptados da indústria do papel. Em 2015, a empresa possuía 43 colaboradores em Itália e 32 no México. A Artimpianti fornece linhas de produção chave na mão para a indústria da fundição de alumínio para diversos países (ABB, 2015b).

Esta empresa possui um grande conhecimento tecnológico relativo à integração de robótica em linhas de produção, o que fornece vantagens no mercado. A Artimpianti possui uma grande capacidade de projetar e produzir (utilizando simulações em três dimensões avançadas). As células são desenvolvidas e testadas nas instalações da empresa, sendo reconstruídas na fábrica do cliente pelos colaboradores da Artimpianti. Após a instalação é fornecida formação e serviços de manutenção.

A Artimpianti começou a implementar robótica na indústria da fundição em 1991, de forma a eliminar atividades perigosas para humanos e facilitar a manutenção. A ABB foi uma das primeiras empresas a propôr a utilização de robôs neste tipo de indústria, colaborando há mais de 10 anos com a Artimpianti. Os técnicos desta empresa utilizam o ABB RobotStudio, conseguindo reduzir o tempo de implementação das soluções no cliente final. A utilização deste *software* permite ao cliente seguir o desenvolvimento da solução, em tempo real, até à sua conclusão.

Atualmente, a indústria dos automóveis prioriza a flexibilidade de produção das fábricas de fundição em vez do volume de produção. Preferem-se linhas de fundição que produzam 33 a 45 peças por hora, onde possam ser realizadas alterações rápidas no processo de produção. Esta solução em concreto foi desenvolvida para uma fábrica de fundição russa que estava a produzir peças para um grande fabricante de carros europeu. A Artimpianti desenvolveu e instalou duas linhas automatizadas inovadoras, sendo compostas por três bancadas cada uma, substituindo o tradicional robô cartesiano, ou articulado, que normalmente está montado no chão.

Em colaboração com a ABB, foi desenvolvido um sistema com uma viga única, posicionada atrás das mesas de trabalho, para manipular o núcleo e o metal líquido. Na mesma viga encontra-se suspenso um manipulador robótico IRB 6620 da ABB, que é utilizado para retirar a peça do molde e deslocá-la para a área de pré-finalização, onde esta é arrefecida, limpa e os excessos são cortados. Depois é colocada num transportador que a deixa na temperatura correta e, de seguida, transporta-a para a zona de acabamentos.

O *layout* da célula foi desenvolvido de maneira a fornecer mais visibilidade no espaço de trabalho onde são realizadas atividades manuais, para não pôr em causa a segurança do operador e para permitir a existência de mais mobilidade. Desta forma, o operador consegue permanecer perto do molde para análise, trabalhar com ele e até alterá-lo, sem necessidade de parar o manipulador robótico, que se encontra nas outras duas zonas de

trabalho. A possibilidade de alteração do molde e ferramentas sem parar a produção aumentou a OEE (*Overall Equipment Effectiveness*)¹ e a produtividade.

A Figura 4.8 ilustra a solução proposta no *software* de programação *offline* da ABB.

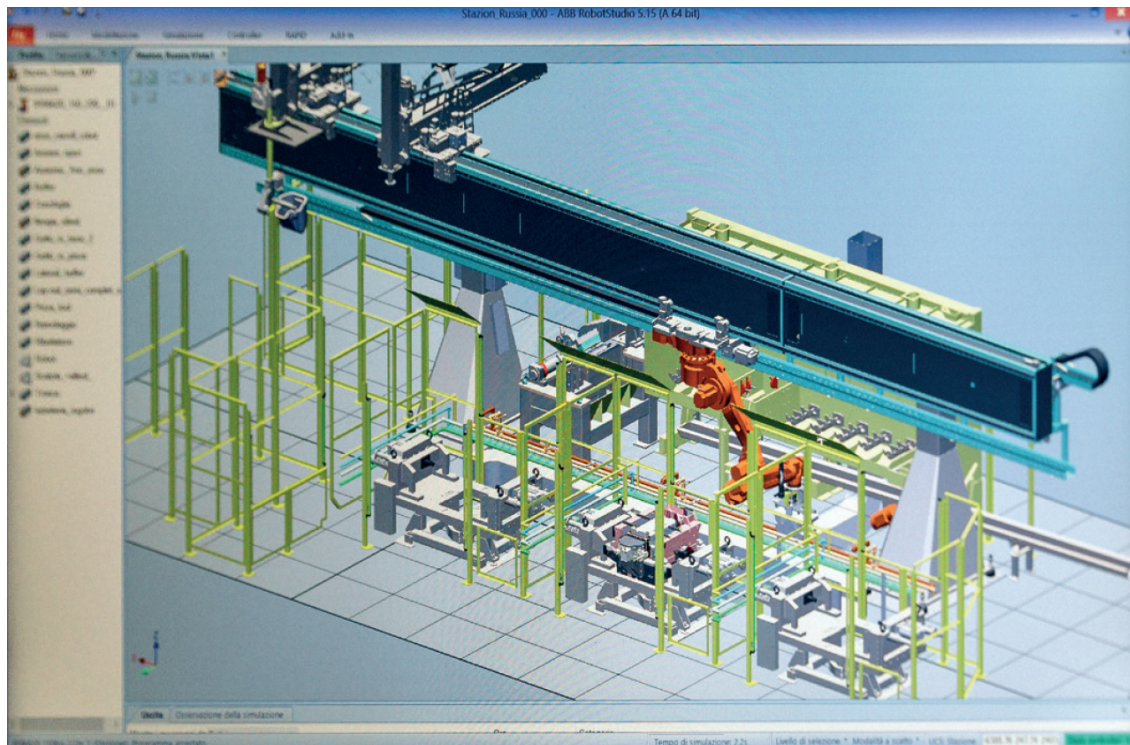


Figura 4.8: Solução proposta realizada no ABB RobotStudio (ABB, 2015b).

4.4.2.1 Conclusão do caso de estudo

A colaboração da empresa Artimpianti com a ABB otimizou a ergonomia do local de trabalho onde a célula foi instalada. Melhorou, também, a segurança e aumentou a produtividade, num mercado com expectativas elevadas devido às inovações tecnológicas (ABB, 2015b).

4.4.3 Implementação de robótica na empresa sueca Ljunghäll AB

Para a empresa sueca Ljunghäll AB, o aumento dos processos automatizados está diretamente ligado ao aumento da eficiência. A Ljunghäll é uma das principais empresas de fundição da Europa, sendo que um dos seus maiores segmentos do mercado é a indústria automóvel. A companhia possui dezenas de robôs ABB em operação nas diversas máquinas de fundição (ABB, 2007a).

Esta empresa valoriza a automatização dos processos, dado que isto permite reduzir o número de fases necessárias no fabrico das peças, aumentando, assim, a produção. A introdução de robótica nas células de fundição permite substituir vários operadores pelos

¹Eficácia geral do equipamento.

manipuladores industriais. A Ljunghäll AB recebe centenas de toneladas de barras de alumínio por ano para serem convertidas em peças no processo de fundição. Todas as células onde esse trabalho é realizado contêm robôs da ABB.

Em 2007, a Ljunghäll AB tinha todos os modelos de robôs da ABB de seis eixos, com exceção do IRB 7600, visto que só necessitava de manipuladores robóticos com capacidade de carga entre 5 e 200 kg.

A Ljunghäll concluiu que é fulcral criar uma linha que começa com o metal líquido e termina com a maquinação completa das peças que vão ser introduzidas diretamente nas linhas de produção dos clientes. A título de exemplo, a utilização das quatro linhas completas, em 2007, para fabricar reservatórios de óleo para carros. A peça é recolhida pelo robô, que vai juntar outros componentes que formam o reservatório. Toda a maquinação da peça é automática, incluindo a limpeza e a secagem, sendo que, de seguida, o manipulador robótico monta os reservatórios e testa o produto final antes deste ser retirado da célula.

O envolvimento da empresa com os seus clientes é essencial desde uma fase inicial. Para isto, a Ljunghäll desenvolve a simulação em computador do processo de fundição completo, para ilustrar a interação entre as ferramentas e o material utilizado na formação das peças. A simulação permite, a ambas as partes, perceber as vantagens e desvantagens em determinadas situações, dando a hipótese de iniciar um diálogo construtivo na procura da melhor solução (ABB, 2007a).

A Figura 4.9 ilustra um manipulador robótico da ABB em funcionamento na empresa Ljunghäll AB.



Figura 4.9: Célula de robótica em funcionamento na Ljunghäll AB (ABB, 2007a).

4.4.3.1 Conclusão do caso de estudo

Neste caso de estudo é possível concluir-se que a implementação de robótica em células de fundição aumenta a produção e diminui o número de etapas necessárias para se atingir o produto final. A empresa Ljunghäll AB concluiu, também, que uma célula robotizada substitui cerca de sete a oito colaboradores. A robotização permite a criação de linhas de produção que começam com o metal líquido e terminam com a maquinaria completa da peça, podendo-se, de seguida, entregá-la ao cliente final para este a colocar na sua linha de produção (ABB, 2007a).

4.4.4 Aumento da produtividade e condições de trabalho com robotização

Em 1998, a empresa fabricante de peças de alumínio VDT Vobra, instalou os seus primeiros robôs nas linhas de produção. Desde aí, a empresa começou a equipar todas as suas células de fundição de alumínio com manipuladores robóticos de seis eixos para extração das peças e lubrificação dos moldes. A empresa Pomac, que é integradora de sistemas ABB, fornecia soluções à VDT Vobra. Em 2007, a VDT Vobra possuía quatro células equipadas com robôs da ABB. Cada célula continha dois robôs, um para lubrificação, ilustrado na Figura 4.10, e outro para extrair a peça, verificar se esta se encontra completa, colocá-la numa tina de água e, de seguida, na prensa (ABB, 2007b).



Figura 4.10: Robô lubrificador da ABB utilizado na VDT Vobra (ABB, 2007b).

A empresa utiliza diversos manipuladores robóticos da ABB, dependendo do tipo das máquinas injetoras. Em 2007, duas células continham um robô IRB 1600 para lubrificação

dos moldes e um IRB 2400 para extração da peça. Outra das células possuía um IRB 2400 para extração e um IRB 140 para lubrificação. Existia, também, outra célula com dois IRB 4400. Adicionalmente, uma célula tinha apenas um robô lubrificador IRB 140. A empresa VDT Vobra procura a perfeição na sua produção, tendo o objetivo de eliminar todos os erros, chegando à conclusão de que com robôs este objetivo é mais atingível, uma vez que elimina o erro humano, tornando a produção mais precisa, havendo uma menor variação na qualidade do produto final (ABB, 2007b).

A utilização de robótica aumenta a eficiência da produção. O gerente da VDT Vobra estimou que, em 2007, a utilização de manipuladores robóticos da ABB aumentou a produção em 15%. Os robôs podem também, no futuro, permitir que um colaborador consiga supervisionar diversas células em simultâneo. O aumento da produtividade depende da eficiência das máquinas e da experiência dos operadores, sendo que esta empresa possui essas características.

4.4.4.1 Conclusão do caso de estudo

Com a implementação de sete manipuladores industriais da ABB, para lubrificação dos moldes e extração das peças das máquinas injetoras (dois IRB 2400, dois IRB 140 e dois IRB 4400), a empresa VDT Vobra apresentou as seguintes melhorias (ABB, 2007b):

1. aumentou em 15% a sua produtividade;
2. aumentou a fiabilidade e qualidade do produto final;
3. tornou mais simples para os seus operadores a programação dos robôs;
4. a experiência dos seus colaboradores aumentou.

4.4.5 Solução robotizada com robôs ABB na empresa Pressmetall

A empresa alemã Pressmetall possui robôs industriais da ABB que realizam com segurança as suas tarefas nas células de fundição: retirar a peça de alumínio da máquina injetora, movendo-a, de seguida, para um dispositivo que vai inspecionar se esta se encontra completa e, depois, colocá-la numa bacia de arrefecimento para baixar a temperatura. Após o arrefecimento, a peça passa por uma estação de secagem, onde água que tenha ficado na mesma é retirada, e, por fim, passa num dispositivo de rebarbagem. Subsequentemente, o manipulador robótico IRB 4400 desloca a peça até à prensa, que remove os massalotes. Se o robô receber a informação de que a peça se encontra defeituosa, esta é colocada numa rampa de saída da célula (ABB, 2015a).

A empresa alemã Pressmetall, que tem como mercado principal a indústria automóvel, obteve, em 2015, o *software* da ABB RobotWare Machine Tending. Este *software* é uma opção do controlador de robôs IRC5, desenvolvido para operar manipuladores industriais da ABB.

Com este *software* é possível aceder-se a diversas etapas do programa do robô durante a operação em automático, podendo ser alteradas sem a necessidade de parar o manipulador. Por exemplo, se for necessário um arrefecimento mais demorado da peça, ou se a água não foi retirada toda de uma vez, é possível realizarem-se alterações durante a operação do manipulador robótico.

As funções básicas, mas importantes, para a produção das peças, tais como iniciar e parar o robô, parar no fim do ciclo e o retornar à posição inicial (função *HomePos Running*) sem existir nenhuma colisão, se ocorrer algum erro, já estão integradas no *software*. O facto desta aplicação possuir a função de *HomePos Running* é um atributo muito positivo, visto que permite a operadores pouco experientes movimentarem o manipulador robótico para a posição inicial sem existir risco de colisão.

Em caso de erro, o operador pressiona o botão de *HomePos* e o manipulador robótico IRB 4440 movimenta-se automaticamente para fora da máquina injetora, sem a existência de qualquer colisão e sem a necessidade de o robô ser movido manualmente com a consola, permitindo que o recomeço da operação seja rápido.

A interface gráfica de interação com o utilizador do *software* RobotWare Machine Tending encontra-se no FlexPendant. A interface foi desenvolvida com símbolos simples que mostram as estações individuais da célula de robótica: a máquina injetora, a bacia de arrefecimento, a estação de secagem, o dispositivo de rebarbagem e a prensa. Mostra, também, as posições do robô, o estado de produção em que este se encontra, tempos de ciclo, informações relativas a componentes e a quantidade de ciclos realizados. O *software* fornece ao operador da célula uma interface intuitiva que permite aos utilizadores aprenderem a trabalhar em pouco tempo.

4.4.5.1 Conclusão do caso de estudo

Antes da implementação do RobotWare Machine Tending, a ABB calculou que a Pressmetall conseguiria poupar meia hora por dia se o manipulador robótico não necessitasse de ser parado quando se encontra em modo automático. Desta forma, o investimento aplicado é recuperado entre um a dois meses. Em 2015, a empresa decidiu comprar 18 licenças do *software*.

4.4.6 Nova célula de fundição com robôs KUKA

A empresa Auto Heinen é um fornecedor reconhecido de células de fundição de alumínio complexas há décadas. No entanto, a empresa quis aumentar o desempenho das suas células, portanto, em 2015, introduziu uma nova célula para fundição de alumínio, desenvolvida e colocada em operação pela KUKA (KUKA, 2016).

A Auto Heinen é uma empresa que, em 2016, dispunha de 260 colaboradores em Bad Münstereifel, produzindo células de fabrico de alumínio há mais de 70 anos, utilizando 13 células de fundição completamente automatizadas. De modo a atingirem os requisitos do

mercado no que toca à disponibilidade do sistema, tempo de ciclo e precisão das peças, a empresa substituiu uma célula de fundição antiga por uma solução moderna, em 2015.

A nova célula de fundição, ilustrada na Figura 4.11, realiza todas as etapas, desde a fundição até ao componente final. A capacidade de produção deste sistema é de 200 000 ciclos por ano, com três turnos em funcionamento. Esta célula produz corpos de borboleta para automóveis, sendo que foi desenvolvida de maneira a conseguir produzir quatro peças num ciclo. Em empresas como a Auto Heinen, a alteração de produtos é frequente, o que implica a existência de uma certa flexibilidade relativamente à alteração dos componentes da célula de robótica.



Figura 4.11: Célula de robótica implementada na Auto Heinen ([KUKA, 2016](#)).

A peça central da solução apresentada é um manipulador robótico de fundição da KUKA, equipado com um manipulador final rotativo com duas garras que agarra as peças produzidas na máquina injetora e as movimenta para cada estação de trabalho dentro da célula, sem existir a necessidade de alterar o manipulador final. Após a remoção da peça da máquina injetora, o robô para numa estação de inspeção equipada com sensores capacitivos ([KUKA, 2016](#)).

De seguida, o manipulador robótico desloca a peça para uma bacia de arrefecimento, para baixar a sua temperatura, de modo a estar pronta para os processos seguintes. Após a finalização dessa etapa, o robô coloca a peça numa prensa. A prensa separa os quatro componentes e remove os restos num único ciclo de trabalho.

A Figura 4.12 ilustra o manipulador robótico a colocar a peça na prensa.



Figura 4.12: Colocação da peça para prensagem (KUKA, 2016).

4.4.6.1 Conclusão do caso de estudo

A solução proposta pela KUKA permitiu à empresa Auto Heinen preencher os requisitos tecnológicos pretendidos no mercado da fundição de alumínio. Esta célula de robótica realiza todos os processos necessários à formação do produto, conseguindo, num único ciclo de trabalho, gerar quatro produtos finais. Isto é possível devido ao manipulador final implementado e, também, à prensa existente.

4.5 Conclusão do capítulo

Este capítulo explica conceitos essenciais no mundo da robótica aplicada na fundição. Primeiro, enumeraram-se diversos casos de aplicações na robótica no manuseamento de materiais, passando-se, de seguida, para a fundição na robótica. Foram explicados os processos necessários à formação da peça na máquina injetora, e as etapas e componentes necessários numa célula de robótica na fundição.

Explicou-se o tema da segurança na fundição e, abordou-se, brevemente, a indústria automóvel e a utilização de alumínio. Por fim, foram apresentados seis casos de estudo, de modo a obter-se conhecimento sobre quais as vantagens e desvantagens de soluções de robótica na fundição.

Com a introdução da robótica na indústria de fundição houve um aumento substancial na eficiência da produção. Reconhece-se que este tipo de indústria apresenta um ambiente adverso para os seus colaboradores, que tem tarefas muito repetitivas, entre outras características. A utilização de manipuladores robóticos permitiu a substituição de pessoas que operavam em postos de trabalho que punham em perigo a sua saúde. Poderia pensar-se que a utilização de robôs diminuiria os postos de trabalho, com consequente despedimento de trabalhadores, mas tal facto não veio a verificar-se, pois através da adaptação a novas posições, a novas tarefas e a reconversão profissional, houve necessidade de manter os colaboradores.

Capítulo 5

Desenvolvimento do modelo de simulação

Uma parte essencial do desenvolvimento deste projeto é o modelo de simulação realizado no ABB RobotStudio, visto que serviu para validar todo o material necessário nos postos de trabalho e comprovar a ausência de colisões.

Neste capítulo são discriminados todos os componentes necessários à implementação das sete células de robótica e explicada a sua integração no processo de produção. São descritos os tipos de manipuladores robóticos utilizados e referidas as características mais importantes. É demonstrado, também, o processo realizado no desenvolvimento do modelo da simulação.

A célula de referência desta dissertação é a C, visto que foi a primeira célula desenvolvida e onde foi investido mais tempo, servindo de base de desenvolvimento para as restantes.

5.1 Descrição do problema

A empresa RobotSol, que desenvolve sistemas de automação industrial, propôs-se a implementar sete células de robótica, denominadas através das letras A, B, C, D, E1, E2 e F, para um cliente que opera na indústria da fundição. O cliente, fabricante de peças de alumínio, tinha como objetivo automatizar as suas células de produção. Estas células já continham máquinas injetoras e prensas de corte, sendo que a extração da peça formada pela máquina era realizada através de um operador humano que utilizava uma pinça para pegar na peça, ficando a arrefecer à temperatura ambiente, para depois ser transportada para a prensa, para ser retirada de seguida.

Este processo de extração realizado por um operador humano apresenta diversos problemas de saúde associados, devido aos fumos que saem da injetora e à temperatura a que esta se encontra logo depois de formar a peça. O objetivo proposto à RobotSol foi substituir o trabalho realizado pelo operador humano através da integração de dois robôs

industriais, por célula, na linha de produção já existente, formada pela máquina injetora e a prensa de corte.

5.2 Descrição do processo

A Tabela 5.1 indica os equipamentos fornecidos pelo cliente, e os que a RobotSol tem de implementar, sendo que a sua integração no processo de produção será explicada de seguida.

Tabela 5.1: Equipamento utilizado nas células robotizadas a implementar.

	Cliente	RobotSol
Máquina injetora	X	
Prensa de corte	X	
Tina de água	X	
Ligações de rede entre equipamentos	X	
Botões de emergência	X	
Equipamentos de movimentação de cargas	X	
Robô extrator (R1)		X
Robô lubrificador (R2)		X
Atuadores finais		X
Pedestais		X
Vedação com portas de segurança		X
Rampas para deslocação das peças para o exterior da célula		X
Matrizes de sensores		X
Sistema de lubrificação para alimentação do <i>gripper</i> do R2		X

Cada uma das células possui uma máquina injetora onde é formada a peça, sendo esta retirada pelo robô extrator, R1. Este manipulador industrial encontra-se posicionado em cima de um pedestal, que lhe permite atingir os pontos necessários dentro do espaço de trabalho. Quando o robô extrator retira a peça, o manipulador destinado à lubrificação (R2) inicia a sua função.

Depois da extração, a peça produzida é deslocada, pelo robô extrator, para uma matriz de sensores, que vai verificar se esta se encontra conforme o esperado, passando, depois, para uma tina de água, onde vai arrefecer. Se a peça estiver em conformidade, o próximo passo é deslocá-la para dentro da prensa de corte, onde vão ser cortados os masselotes.

Se a peça se encontrar em conformidade, mas ocorrer uma rotina de inspeção, o próximo passo, depois do arrefecimento, é deslocá-la para uma rampa de inspeção. Se a peça

apresentar falhas, não existindo ativação de determinado sensor da matriz, é deslocada para uma rampa NOK (*Not OKay*) que a coloca fora da célula, depositando-a num contentor.

A Figura 5.1 apresenta, sob a forma de um fluxograma, os componentes das células de robótica onde o robô extrator passa durante o processo de produção, sendo que a posição inicial refere-se ao posicionamento inicial do manipulador em cima do pedestal.

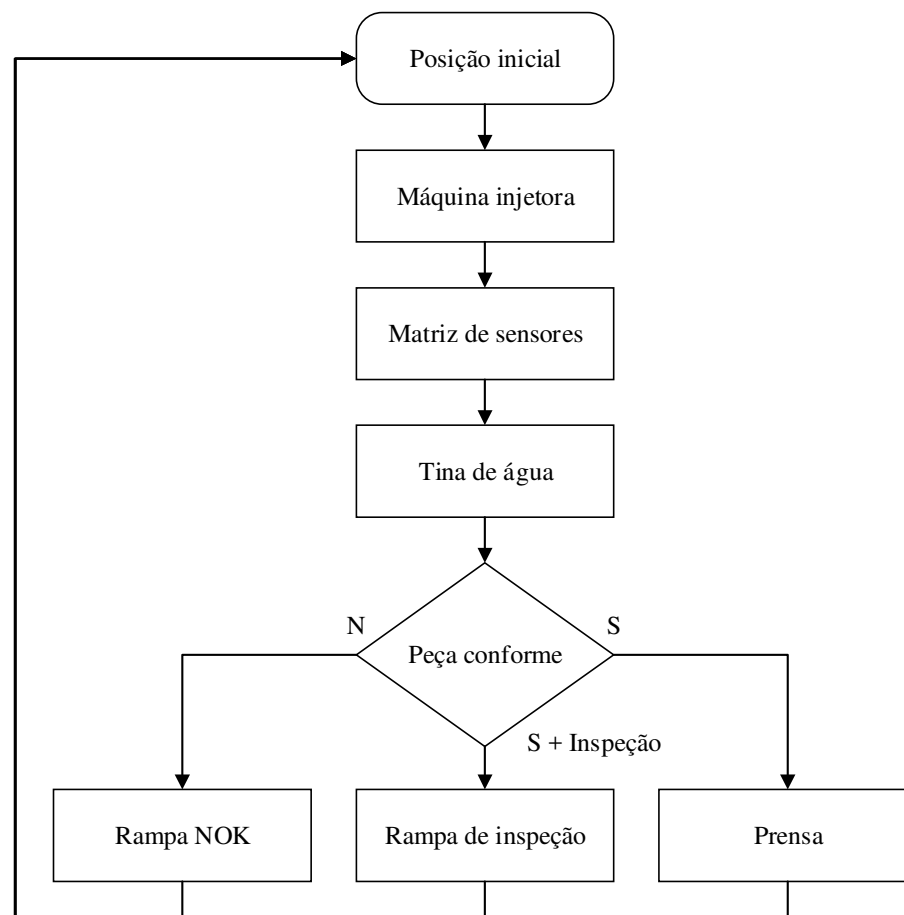


Figura 5.1: Fluxograma geral do processo do robô extrator.

5.3 Layout das células implementadas

Com o apoio do *software* de simulação ABB RobotStudio foram validados todos os componentes que constituem a célula. Primeiramente, foram colocados os componentes principais de cada uma das sete células a implementar, a máquina injetora e a prensa de corte. De seguida, foram colocados os restantes equipamentos: matriz de sensores, tina de água, rampas, pedestal e a rede de segurança. Todos os componentes das células de robótica podem ser reajustados ligeiramente à medida que a trajetória do manipulador robótico de extração da peça é configurada.

5.3.1 Máquina injetora e prensa

Inicialmente, foram colocadas as máquinas injetoras e as prensas de corte no ABB RobotStudio, como demonstra a Figura 5.2, onde se encontra representada a Célula C. A prensa foi colocada alinhando-se, aproximadamente, o seu centro, com a distância média entre os pratos da injetora. Esta distância média irá variar quando a trajetória do robô estiver a ser programada, porque os pratos da injetora apresentam um limite mínimo e máximo de abertura, sendo que o ideal é conseguir implementar-se a trajetória com uma abertura pequena.

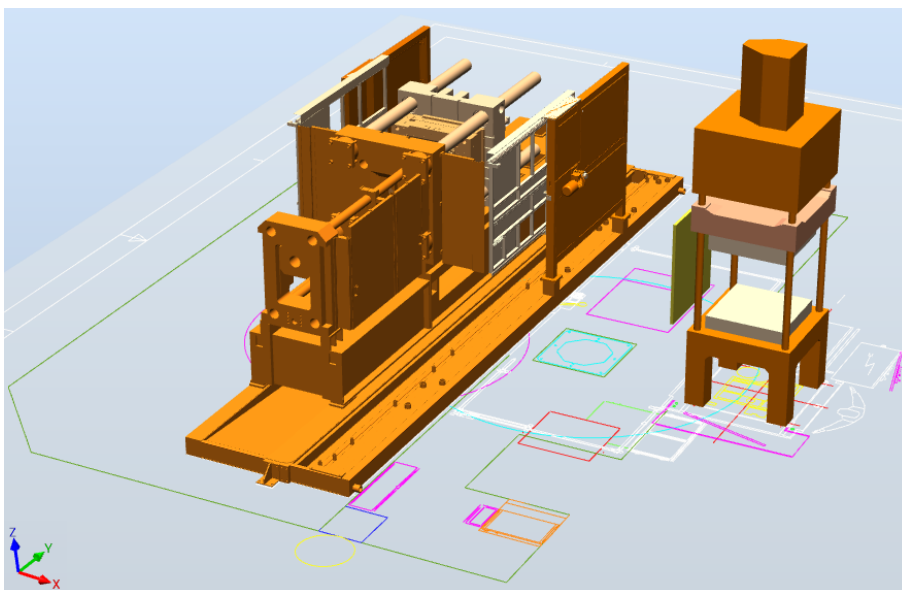


Figura 5.2: Posicionamento das máquinas na Célula C.

Com ajuda do modelo da máquina injetora, fornecido pelo cliente num ficheiro STEP (*STandard for the Exchange of Product model data*), foram obtidas as suas dimensões. É de salientar que este tipo de ficheiro é o mais indicado quando se pretende trabalhar com o ABB RobotStudio, uma vez que permite a manipulação do objeto, sendo que qualquer outro tipo de ficheiro não o permite, impossibilitando o programador de efetuar determinadas tarefas, tais como analisar distâncias dentro das máquinas ou entre componentes do posto de trabalho.

Feita esta análise, relativa à Célula C, verificou-se que a distância que o manipulador industrial teria de atingir, no eixo z , dentro da máquina injetora, aproximadamente no centro dos pratos, é de 1744 mm.

A Célula C possui uma prensa de 40 t, ilustrada na Figura 5.3, que vai conter um cortante fixo na parte de baixo e um cortante móvel na parte de cima. O cortante fixo possui 150 mm, fazendo com que a posição que o manipulador robótico tem de atingir se encontre a 1050 mm no eixo z .

Para efeitos de simulação *offline* foram configurados mecanismos em todas as injetoras e prensas. Nas máquinas injetoras, com a opção *Create Mechanism* do RobotStudio, as portas do lado do robô e do lado do operador, abrem e fecham, tal como a porta da prensa. Isto possibilita a obtenção de uma melhor percepção da realidade, visto que estes mecanismos vão interagir com o robô durante a simulação *offline*, tal como na célula real.

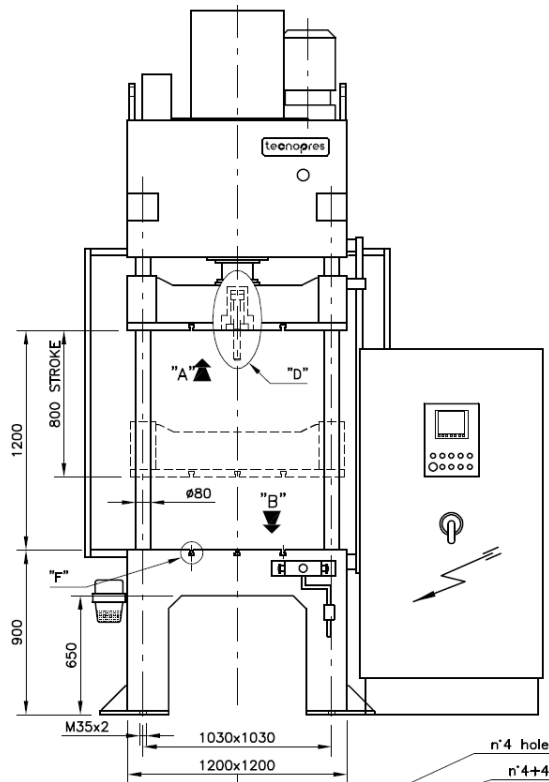


Figura 5.3: Desenho técnico da prensa da Célula C.

5.3.2 Molde centrado e descentrado

A RobotSol comprometeu-se a desenvolver uma solução flexível, tendo o cliente fornecido dois tipos de moldes diferentes, para cada máquina injetora, um onde a pega é realizada no centro da peça e outro onde é descentrada.

O cliente forneceu desenhos técnicos de todas as injetoras utilizadas nas células, o que permitiu a obtenção da informação relativa à abertura dos pratos. Usando como exemplo a Célula C, com o desenho ilustrado na Figura 5.4, interpreta-se que a abertura máxima dos pratos da injetora é 1690 mm e a abertura mínima 385 mm.

O ideal é que a abertura seja o menor possível, sendo que isto depende do tamanho da peça formada na máquina e, também, dos seus moldes. A abertura foi definida colocando-se o manipulador robótico dentro da injetora, já com o seu *gripper*, realizando-se o movimento de extração da peça sem a ocorrência de nenhuma colisão, existindo, no mínimo, 90 mm de folga entre qualquer obstáculo.

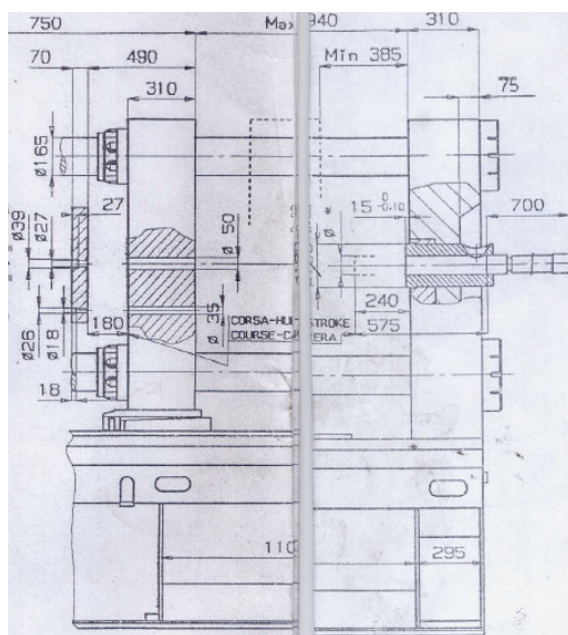


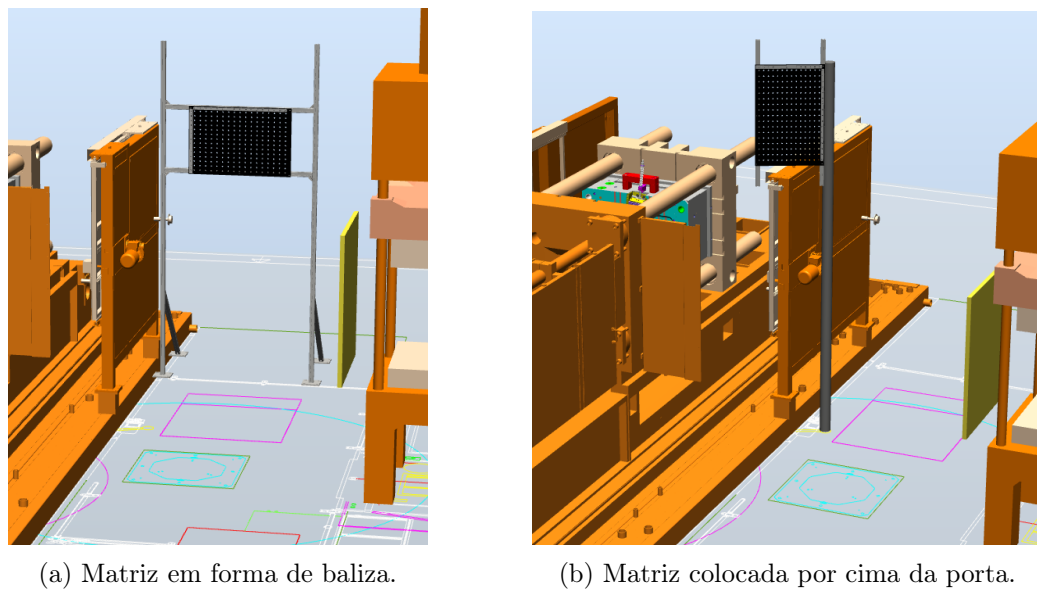
Figura 5.4: Desenho técnico da máquina injetora de 750 t.

5.3.3 Matriz de sensores

Este componente serve para verificar se a peça extraída da máquina injetora se encontra conforme o esperado ou não. A matriz de sensores foi testada em duas posições, ilustradas na Figura 5.5. Na posição um, demonstrada na Subfigura 5.5a, a matriz encontra-se posicionada em cima da zona onde a tina de água se encontrará inserida. Na Subfigura 5.5b, posição dois, a matriz está em cima da porta da máquina injetora.

A matriz de sensores é o componente para onde o manipulador robótico se desloca após realizar a extração da peça formada na máquina injetora. Devido à existência da tina de água e do pedestal, onde o robô está colocado, para haver uma poupança de espaço em cada uma das sete células, a matriz de sensores foi projetada para se encontrar, aproximadamente, à altura da porta da injetora estando, portanto, a uma altura de 2445 mm.

A escolha da posição final refletiu-se no estudo do movimento do manipulador industrial, dado que o ideal seria uma movimentação suave, sem mudanças bruscas. Na Subfigura 5.5a a matriz estaria localizada em cima da tina de água, fazendo com que estivesse sujeita a elevadas temperaturas. A adicionar a isto, ocorreria um movimento mais brusco do robô. Assim, a melhor posição foi a encontrada na Subfigura 5.5b, visto que o robô passa pela matriz num movimento suave e em continuidade com o da extração da peça. O tamanho do painel da matriz varia de acordo com o tamanho das peças formadas pelas máquinas injetoras.



(a) Matriz em forma de baliza.

(b) Matriz colocada por cima da porta.

Figura 5.5: Posições da matriz de sensores na Célula C.

5.3.4 Tina de água

Este componente serve para refrigerar a peça que se encontra a temperaturas elevadas quando é retirada pelo robô da máquina injetora. Existem três tipos de tinas de água, descritos na Tabela 5.2, sendo que as letras A, B e C representam as dimensões dos lados ilustrados na Figura 5.6. Relativamente à Celula C, o manipulador robótico tem, portanto, de atingir uma altura de 1000 mm para inserir a peça na tina de água.

O robô desloca-se para a tina de água após realizar a aferição da peça na matriz de sensores. Visto que a matriz se vai encontrar por cima da porta da máquina injetora, de modo a dar continuidade à movimentação do manipulador robótico, a tina vai estar posicionada ao lado da porta da máquina e da matriz de sensores.

Tabela 5.2: Medidas das tinas de água.

	A (mm)	B (mm)	C (mm)
Célula A	1250 mm	1050 mm	1050 mm
Células C e B	1050 mm	1050 mm	850 mm
Células D, E1, E2 e F	850 mm	850 mm	850 mm

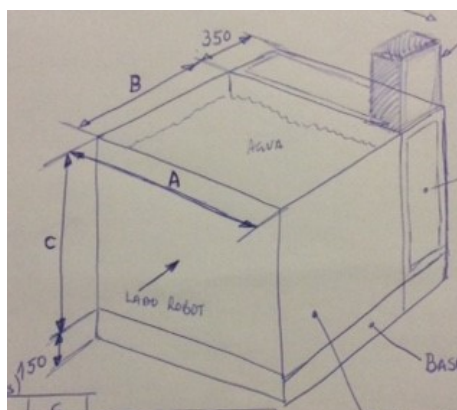


Figura 5.6: Folha informativa das tinas de água fornecida pelo cliente.

5.3.5 Rampas

Em cada uma das sete células de robótica a implementar vão estar presentes dois tipos de rampas (as de inspeção e as NOK) sendo que estas servem como saída da célula da peça formada. O manipulador robótico tem, portanto, de atingir a altura das rampas. As células vão encontrar-se delimitadas por uma rede de segurança, estando ambas as rampas localizadas em aberturas dessa rede. A rede de segurança não ultrapassa a altura da matriz de sensores, que se encontra por cima da porta da máquina injetora, depreendendo-se que as rampas se vão encontrar a uma altura inferior a 2445 mm.

Como as rampas são a saída da célula de robótica, se se pretender um ciclo de inspeção ou se a peça se encontrar NOK, a sua posição no posto de trabalho deve ser após o arrefecimento das peças. Deste modo, analisando-se o posicionamento dos restantes objetos, depreende-se que as rampas devem ser posicionadas após a prensa, perto da porta de entrada na célula.

O tamanho das duas rampas é variável e depende do tamanho das peças formadas nas respetivas máquinas injetoras. É necessário ter-se em conta que tem de existir um mínimo de flexibilidade nas células, para que, se forem trocados os moldes, as rampas também funcionem.

5.3.6 Pedestais

Feita a análise das distâncias a atingir pelo robô nas células, coloca-se o pedestal do robô de extração da peça, porque este não conseguiria efetuar as trajetórias pretendidas se estivesse ao nível do solo. O pedestal foi colocado a uma distância média entre os pratos da máquina injetora e o centro da prensa, para se encontrar numa posição central da célula.

A distância entre a máquina injetora e a prensa é 4300 mm, uma vez que ao colocar-se o pedestal a meio, o manipulador robótico, com a adição de um *gripper*, consegue atingir as posições pretendidas. Foi definido, para a Célula C, um pedestal com 850 mm. Os pedestais

destinados ao robô lubrificador (R2) apresentam uma altura que permite ao manipulador industrial atingir todos os pontos necessários dentro da máquina injetora.

Encontram-se sumariados, na Tabela 5.3, todos os pedestais utilizados. As suas alturas foram definidas utilizando o mesmo método de escolha na Célula C.

Tabela 5.3: Pedestais utilizados nas células.

Célula	Pedestal R1	Pedestal R2
A	900 mm	200 mm
B	950 mm	105 mm
C, D, E1, E2, F	850 mm	105 mm

A Tabela 5.4 indica as distâncias que o manipulador industrial tem de atingir, sendo que os eixos encontram-se representados na Figura 5.2.

Tabela 5.4: Resumo das distâncias a atingir por R1 na Célula C.

	Eixo x	Eixo y	Eixo z
Máquina injetora	2200 mm	100 mm	1744 mm
Matriz sensores	1050 mm	1050 mm	2445 mm
Prensa	2098 mm	2 mm	1050 mm
Tina de água	125 mm	1417 mm	1000 mm
Rampas	788 mm	1793 mm	<2445 mm

Com a adição dos pedestais, a distância a atingir pelo robô (em altura) diminui substancialmente, visto que este deixa de se encontrar situado no chão, ficando posicionado ao nível do pedestal (850 mm, no caso da Célula C), conseguindo, assim, atingir as posições pretendidas.

5.3.7 Redes de segurança

As redes de segurança foram colocadas após a validação da posição final de todos os componentes, sendo essencial para impossibilitar a aproximação entre os operadores das células e os manipuladores robóticos durante a produção.

5.3.8 Layout a duas dimensões

Sempre que é efetuada alguma alteração a nível de dimensões e posição dos componentes, é criado um *layout* a duas dimensões, desenvolvido no *software* DraftSight. Na Figura 5.7 encontra-se ilustrado o *layout* da Célula C.

O *layout* a duas dimensões foi colocado no RobotStudio, permitindo a existência de coordenação entre os diversos departamentos da empresa e o cliente, relativamente à validação dos componentes das sete células.

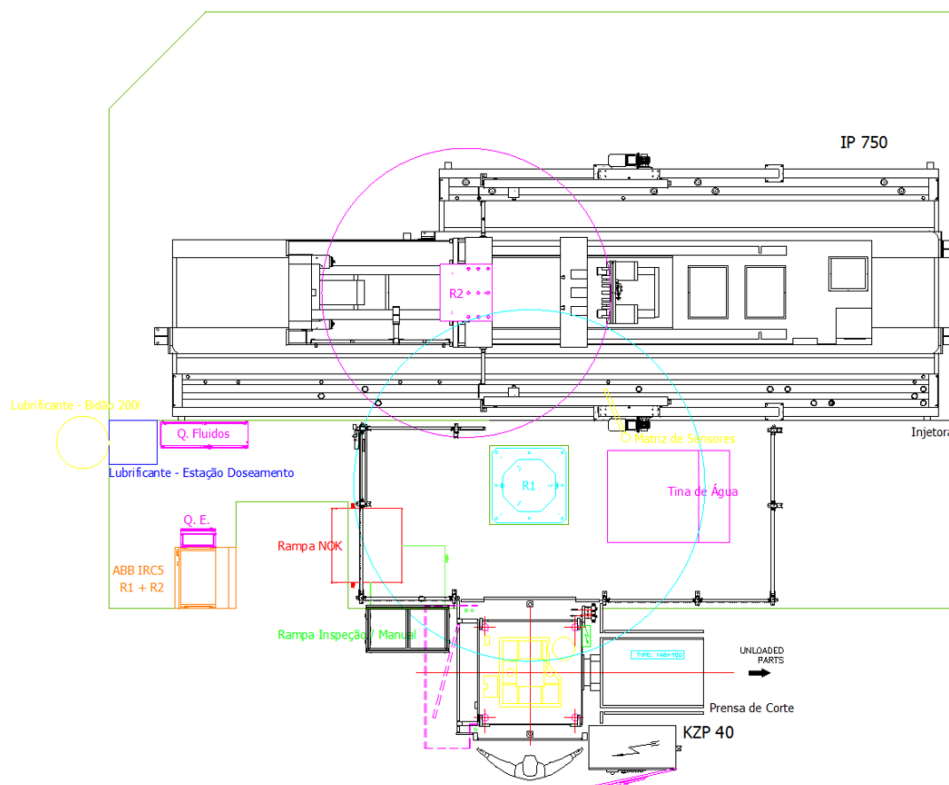


Figura 5.7: *Layout* a duas dimensões da Célula C.

5.4 Manipuladores robóticos

A empresa fornecedora de robôs escolhida pela RobotSol para este projeto foi a ABB. Todos os robôs selecionados são Foundry Plus, que é um sistema que protege os manipuladores robóticos das condições encontradas na indústria da fundição.

De entre os diversos manipuladores robóticos da ABB, foram escolhidos três modelos para integrar as sete células: IRB 6700 175/3.05; IRB 4600 45/2.05; IRB 2600 20/1.65; todos com a utilização do controlador IRC5. Esta escolha foi realizada efetuando-se um estudo relativo às diversas condicionantes presentes: o peso dos atuadores finais e das peças que são produzidas em cada uma das células, e as características de desempenho dos robôs.

Em relação ao IRB 6700, existem oito modelos diferentes. O modelo escolhido possui uma capacidade de carga de 175 kg e um alcance de 3.05 m. Estas características são suficientes para o objetivo deste manipulador industrial. Este robô é o único modelo deste tipo utilizado nas sete células, estando destinado ao robô extrator da Célula A, visto que a máquina injetora é substancialmente maior que as outras.

Dentro da gama IRB 4600 existem quatro modelos diferentes. O modelo escolhido possui 45 kg de capacidade de carga e 2.05 m de alcance. Este modelo possui uma capacidade de carga e alcance suficiente para o seu objetivo. De realçar que, de entre os quatro manipuladores desta gama, este é o robô que apresenta melhores resultados relativamente à

repetibilidade e à exatidão. Este robô será utilizado tanto na lubrificação como na extração das peças.

Relativamente ao IRB 2600, existem cinco modelos diferentes, sendo que o escolhido possui uma capacidade de carga de 20 kg e um alcance de 1.65 m. Este robô é o que apresenta maior capacidade de carga nesta gama, visto que um dos seus objetivos é suportar o peso do atuador final que realiza a lubrificação. De salientar que o modelo utilizado é o que possui melhor exatidão nas trajetórias que efetua. Este manipulador robótico é também utilizado para extração das peças.

Com a utilização de uma opção do RobotStudio que permite a visualização do volume de trabalho a três dimensões de todos os robôs, verificou-se que, com a adição de um atuador final, seria possível atingir todos os pontos necessários dentro da célula. Isto é exemplificado com a Célula C, ilustrada na Figura 5.8, onde se encontra, a verde, o volume de trabalho do robô extrator, assim como todos os componentes da Célula C, incluindo ambos os manipuladores utilizados: IRB 4600 (extrator) e IRB 2600 (lubrificador).

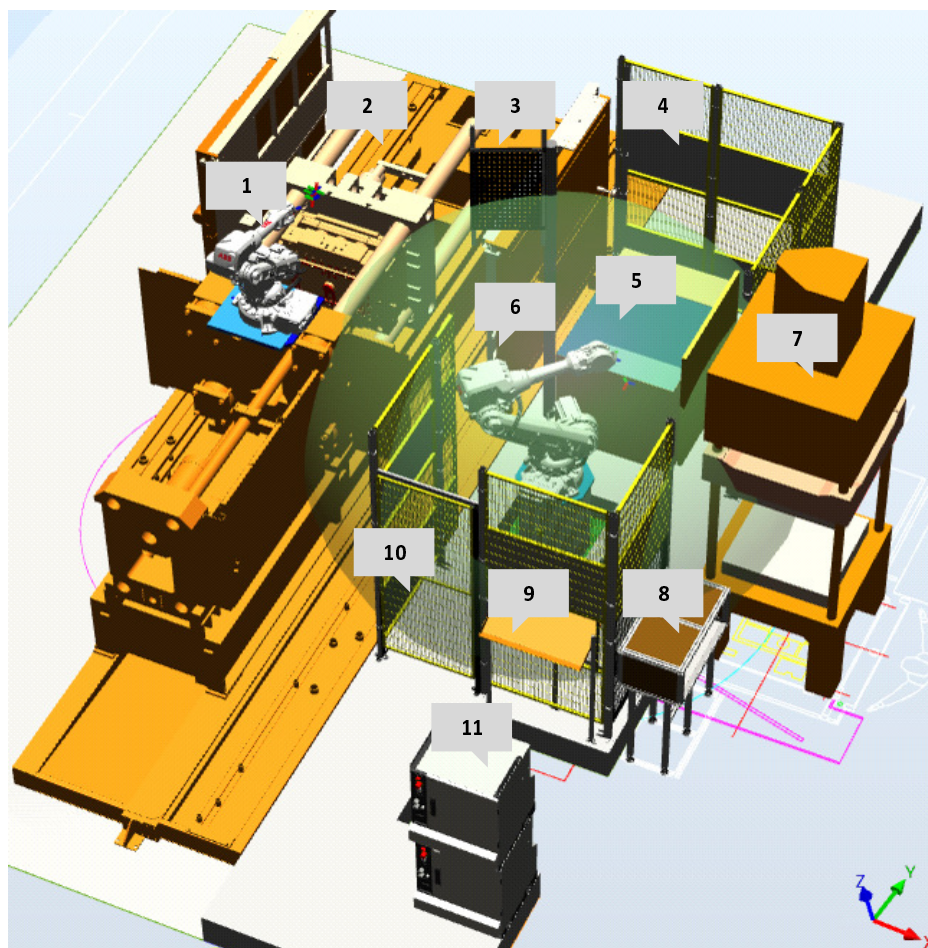


Figura 5.8: Célula C com todos os seus componentes: 1. robô lubrificador com o seu pedestal; 2. máquina injetora; 3. matriz de sensores; 4. rede de segurança; 5. tina de água; 6. robô extrator com o seu pedestal; 7. prensa; 8. rampa de inspeção; 9. rampa NOK; 10. porta de segurança; 11. controladores dos robôs.

A verificação do volume de trabalho que pode ser observado na Figura 5.8, foi realizada nas sete células robotizadas a implementar.

No Anexo B encontram-se tabeladas as características mais importantes dos modelos dos manipuladores robóticos escolhidos. Na Tabela 5.5 encontram-se descritos os manipuladores industriais utilizados nas sete células robotizadas, com as respectivas máquinas injetoras e prensas de corte.

Tabela 5.5: Robôs utilizados nas células.

Célula	Injetora	Prensa	Extrator	Lubrificador
A	1600 t	80 t	ABB IRB 6700	ABB IRB 4600
B	950 t	50 t	ABB IRB 4600	ABB IRB 2600
C	750 t	40 t	ABB IRB 4600	ABB IRB 2600
D	700 t	40 t	ABB IRB 2600	ABB IRB 2600
E1	560 t	25 t	ABB IRB 2600	ABB IRB 2600
E2	560 t	25 t	ABB IRB 2600	ABB IRB 2600
F	500 t	25 t	ABB IRB 2600	ABB IRB 2600

5.4.1 Atuadores finais

A escolha dos atuadores finais foi realizada de acordo com a função do manipulador robótico, ou seja, para os robôs lubrificadores, foi desenvolvido um *gripper* que permite realizar a limpeza dos moldes das máquinas injetoras. Por sua vez, para os robôs extratores foram desenvolvidos *grippers* que permitem agarrar na peça e transportá-la pelas diversas etapas existentes na célula.

A ABB possui um *software* próprio, o RobotLoad, que permite verificar se um determinado atuador final é suportado por determinado manipulador robótico, sendo que, dependendo dos resultados dos testes efetuados neste programa, os *grippers* podem ser modificados para acomodar determinadas exigências, sem perderem a sua capacidade de realização de tarefas. Para se desenvolver os *grippers* é necessário estudar-se os diagramas de cargas dos manipuladores.

5.4.1.1 Atuador final do robô extrator

A Figura 5.9, ilustra o diagrama de carga do robô IRB 4600 utilizado como extrator na Célula C, sendo essencial para o desenvolvimento da garra utilizada para pegar na peça extraída da máquina injetora. Torna-se, então, necessário fazer um estudo relativo ao peso das peças produzidas na máquina injetora de 750 t, para se determinar o peso máximo que o atuador final do robô extrator pode possuir. A informação fornecida, por parte do cliente, indicava que nenhuma das peças produzidas pelas máquinas injetoras de qualquer célula ultrapassaria 19 kg. No caso da Célula C, o peso das peças produzidas seria, no máximo, 14.5 kg.

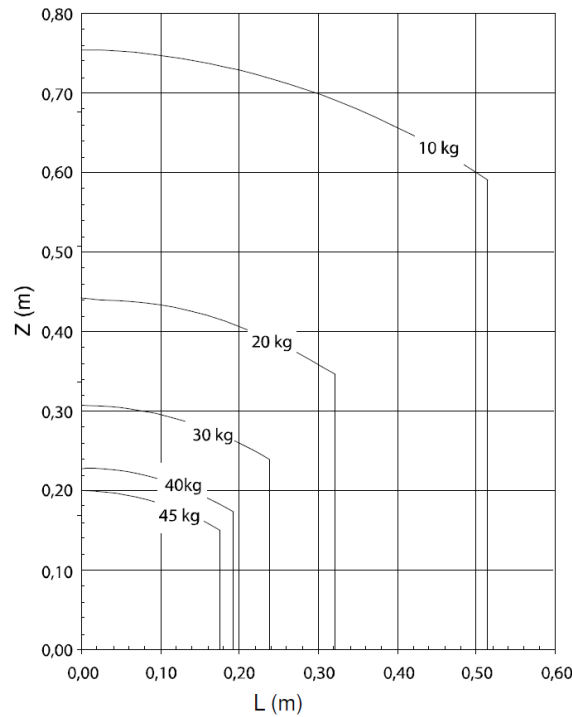
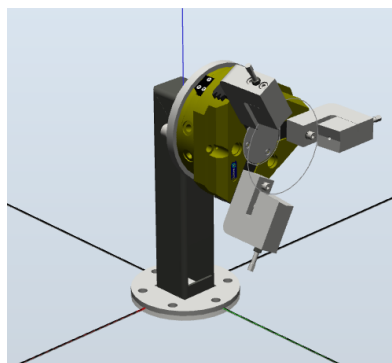
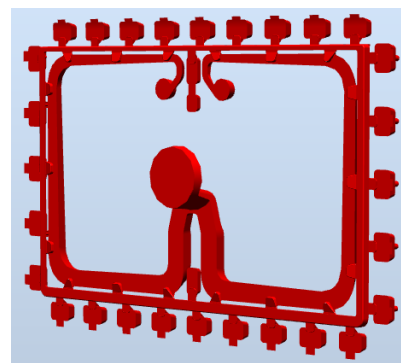


Figura 5.9: Diagrama de carga do robô para o IRB 4600 utilizado (ABB, d).

Portanto, tem de existir uma conjugação de características do *gripper*, entre o peso e as suas dimensões. Para possibilitar a extração da peça foi desenvolvida uma garra pneumática com três pinças, demonstrada na Subfigura 5.10a, visto que a pega da peça é circular, como ilustra a Subfigura 5.10b. Calcula-se, então, que o peso da garra se encontre entre 10 a 12 kg, dependendo do seu tamanho final. Assim, o peso total a ser suportado pelo IRB 4600 é de, no máximo, 26.5 kg. Analisando-se o seu diagrama de carga, assume-se que o *Center of Gravity* (CoG)¹ do atuador final do robô extrator da Célula C pode possuir até 440 mm de altura e 320 mm de desvio lateral.



(a) *Gripper* do robô destinado à extração da peça.



(b) Modelo da peça formada pela máquina injetora.

Figura 5.10: Desenvolvimento da garra do robô extrator.

¹Centro de gravidade.

A Tabela 5.6 apresenta as dimensões, relativamente ao TCP (situado no centro das três pinças), de todos os atuadores finais dos robôs que realizam a extração.

Tabela 5.6: Dimensões dos *grippers* dos robôs extratores até ao TCP.

Célula	Altura	Desvio lateral
A, B, D, E1, E2 e F	332 mm	172 mm
C	232 mm	172 mm

Para se realizar a configuração das trajetórias do robô, tendo como ponto de referência o seu TCP, tem de se anexar o atuador final ao robô extrator. Com a opção *Create Mechanism*, do RobotStudio, foi configurado o TCP do *gripper* e também o seu movimento de abrir e fechar, de modo a se fornecer uma melhor visualização da realidade ao cliente final.

Após a criação da ferramenta podem ser configuradas posições, como a garra aberta e fechada, definindo-se o tempo, em segundos, da sua abertura e do seu fecho, criando-se, assim, o movimento do *gripper*.

A Figura 5.11 demonstra as duas posições do atuador final, tal como o seu TCP.

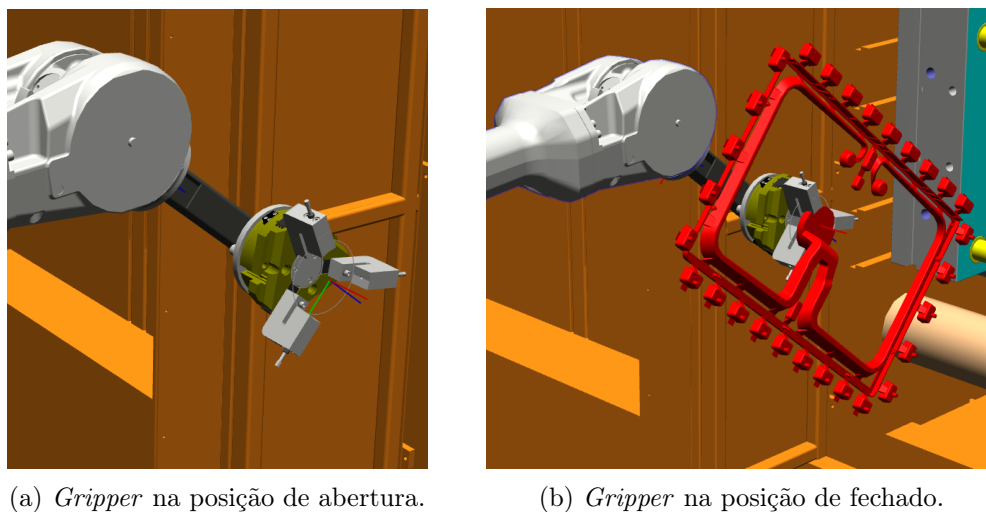


Figura 5.11: Posições do *gripper* do robô extrator da Célula C.

Para o *gripper* manipular a peça e realizar a trajetória interagindo com esta, durante a simulação, também é necessário realizar-se uma configuração no RobotStudio. No menu *Simulation*, existe uma opção designada por *Configure*, que permite ao utilizador programar eventos. Foram criados dois eventos, um que permite à garra pousar o objeto e outro que permite agarrá-lo.

RobotLoad

Para validar o peso do *gripper* desenvolvido, a ABB possui um *software* designado por RobotLoad que permite efetuar testes de modo a validar o funcionamento de atuadores

finais. Foi necessário introduzir-se o peso, TCP, centro de massa e momento de inércia. Todos os valores introduzidos no *software* foram fornecidos pela aplicação onde foi desenvolvido o atuador final. Este teste foi realizado com o *gripper* da Célula B, dado que possui o mesmo robô extrator da Célula C, mas o atuador final contém 100 mm a mais em altura. Com a validação do teste da Célula B, a C fica automaticamente validada. Neste caso, o peso da peça é 14.5 kg e do *gripper* 11.6 kg.

Como se pode observar na Figura 5.12, o manipulador robótico IRB 4600 suporta a carga do *gripper* e da peça. O gráfico designado por *Load Diagram* apresenta o CoG da carga que, como se pode observar, encontra-se dentro dos limites de peso (*Total Handling Weight* (THW)). O gráfico designado por *Ratings* demonstra, em percentagem, a amplitude máxima permitida. Como se pode observar, nenhuma característica ultrapassa os 100%. O significado de cada uma das características é o seguinte:

1. CoGZ - distância do centro de gravidade, no diagrama de cargas, na direção *Z*, relativamente ao limite;
2. CoGL - distância do centro de gravidade, no diagrama de cargas, na direção *L*, relativamente ao limite;
3. J5 - momento de inércia da massa total para o eixo cinco;
4. J6 - momento de inércia da massa total para o eixo seis;
5. T6-T2 - binário estático dos eixos dois ao seis.

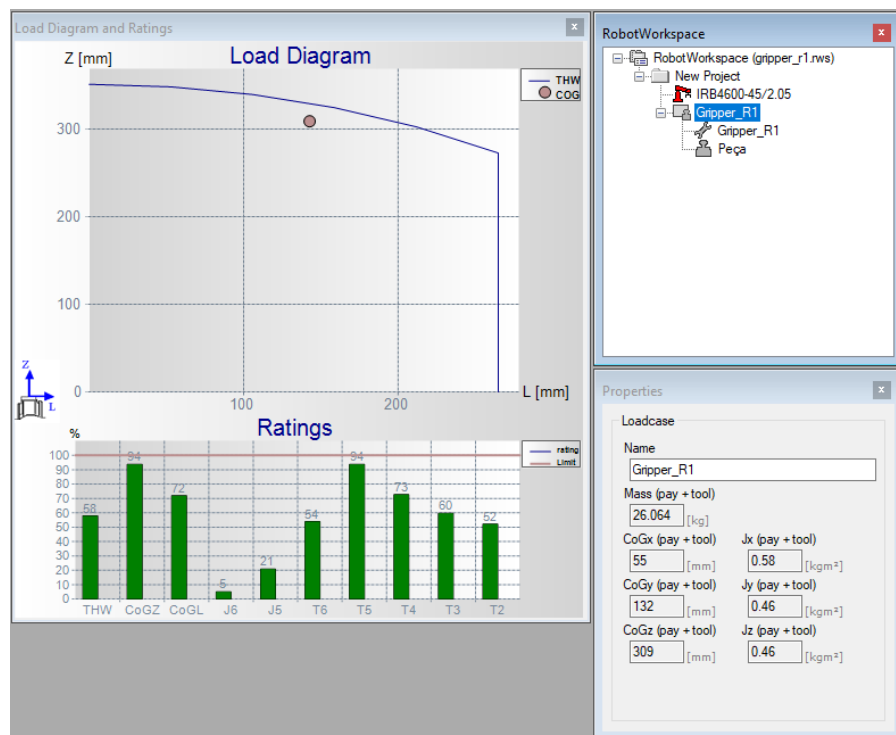


Figura 5.12: Resultados do teste do *gripper* do R1 no RobotLoad.

O RobotLoad permite a obtenção da expressão, em linguagem RAPID, das características do atuador final, para se colocar no RobotStudio:

```
PERS tooldata Gripper_R1:=[TRUE, [[0,172,332],[1,0,0,0]],
[11.564,[122.839,81.585,280.137],[1,0,0,0],0.506975,
0.348418,0.314595]]
```

5.4.1.2 Atuador final do robô lubrificador

A função do robô lubrificador é a limpeza dos moldes das máquinas injetoras, ou seja, é necessário um atuador final que consiga realizar essa tarefa. A empresa RobotSol desenvolveu um *gripper* que utiliza ar e água.

O atuador final deste robô necessita de suportar diversos tubos e peças que permitam realizar a sua função. Deste modo, para a Célula A calculou-se que o *gripper* necessitaria de, aproximadamente, 40 kg, e as restantes células 21 kg. Para a Célula C necessita-se, então, de analisar o diagrama de carga do robô IRB 2600, ilustrado na Figura 5.13. Este diagrama de cargas apresenta uma limitação, pois é destinado apenas para variações do ângulo do atuador final até 10°.

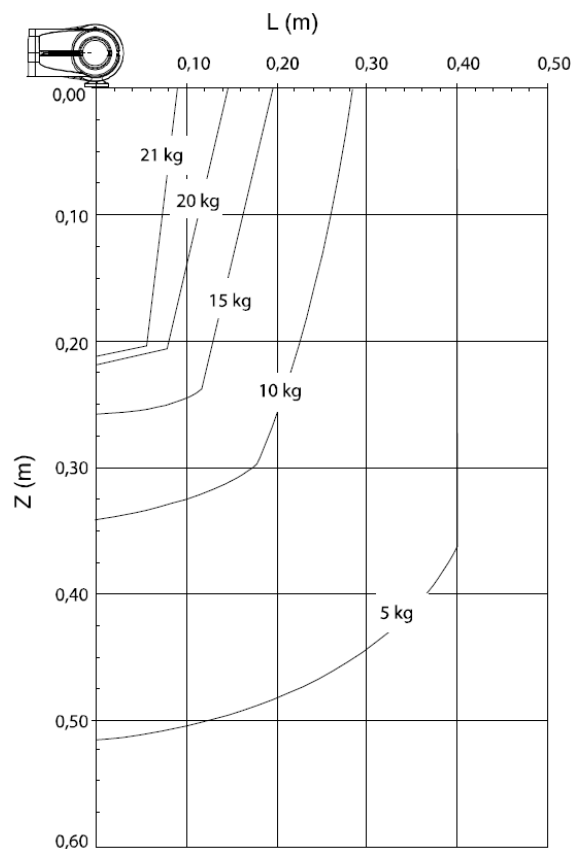


Figura 5.13: Diagrama de carga do robô para o IRB 2600 utilizado (ABB, c).

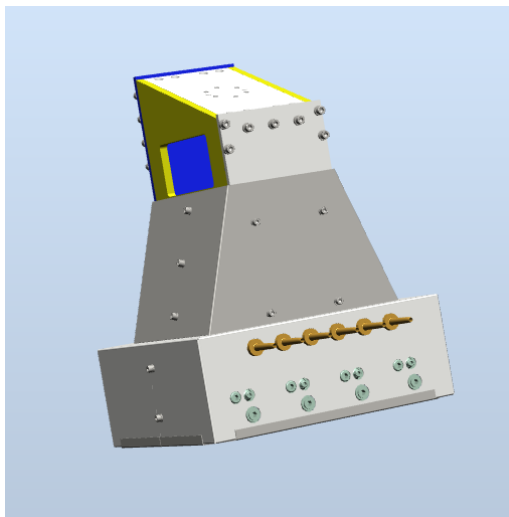
O atuador final da Célula C, ilustrado na Subfigura 5.14a, é igual ao das outras células, com exceção da A, visto que a área a limpar nos moldes é maior. Como se pode observar na figura, estes atuadores finais do robô lubrificador possuem seis bicos laranja, à frente e atrás, por onde sai o ar necessário para secar o molde depois de ser lavado.

Antes da secagem, o *gripper* solta água e ar simultaneamente pelos buracos situados por baixo dos bicos (quatro à frente e quatro atrás). A Célula A, sendo a única célula onde foi necessário um atuador final maior, possui nove bicos laranja (em cada lado) para a secagem, e oito (em cada lado) para a limpeza com água e ar.

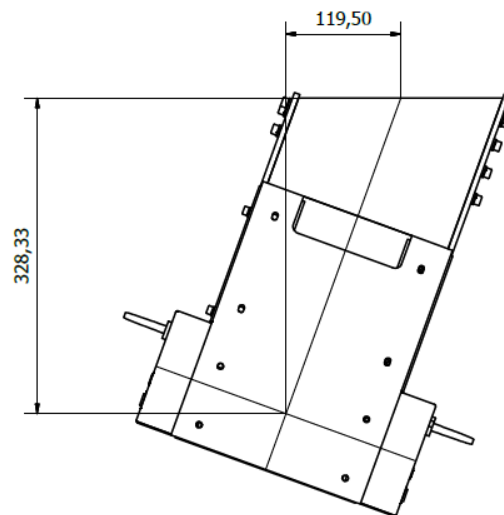
Primeiramente, para se testar a exequibilidade das trajetórias deste atuador final, este foi desenvolvido sem nenhum ângulo de inclinação na sua base. Na programação da trajetória, com o *gripper* com uma inclinação de 0° , a movimentação necessária para se efetuar a limpeza dos moldes não era possível, visto que este passava por singularidades e, como o espaço de movimentação é reduzido, ocorriam colisões.

Para se ultrapassar o problema das singularidades, testaram-se várias hipóteses de ângulos na base do atuador final, para não acontecer um alinhamento dos eixos quatro e seis. Após diversas tentativas, definiu-se um ângulo de 20° , concluindo-se que, com este ângulo, o manipulador industrial realiza toda a trajetória necessária com suavidade e sem nenhuma singularidade.

Na configuração do mecanismo do *gripper* no RobotStudio, definiu-se o TCP ilustrado na Subfigura 5.14b.



(a) Modelo *offline* do *gripper* do robô lubrificador da Célula C.



(b) TCP do *gripper* do robô lubrificador da Célula C.

Figura 5.14: *Gripper* do robô lubrificador da Célula C.

A Tabela 5.7 apresenta as dimensões, relativamente ao TCP, de todos os atuadores finais dos robôs que realizam a lubrificação.

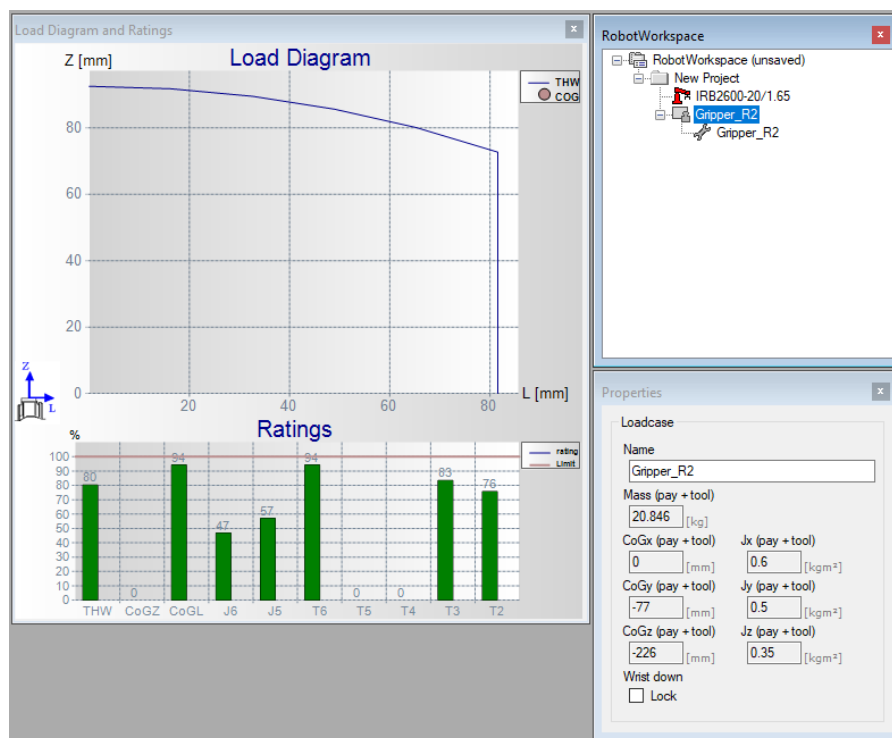
Tabela 5.7: Dimensões dos atuadores finais dos robôs lubrificadores até ao TCP.

Célula	Altura	Desvio lateral
A	621 mm	223 mm
C, B, D, E1, E2 e F	328 mm	119 mm

RobotLoad

Para validação do peso do atuador final desenvolvido, utilizou-se novamente o *software* RobotLoad, introduzindo-se o peso, TCP, centro de massa e momento de inércia do atuador final, sendo o peso do *gripper* 20.8 kg. Todos os valores introduzidos no *software* foram fornecidos na aplicação onde foi desenvolvido o atuador final.

Este teste foi realizado com o atuador final da Célula C, sendo que é o mesmo que é utilizado nas outras células, com exceção da A. Como se pode observar na Figura 5.15, o manipulador robótico IRB 2600 suporta a carga do *gripper*. O gráfico *Ratings* demonstra que nenhuma característica ultrapassa os 100%, ou seja, não há sobrecarga.

Figura 5.15: Resultados do teste do *gripper* do R2 no RobotLoad.

A expressão, em linguagem RAPID, obtida no RobotLoad, das características do atuador final é a seguinte:

```
PERS tooldata Gripper_R2:=[TRUE, [[0,-119.5,328.33],[0.984808,
0.173648,0,0]], [20.846,[-0.009,-76.876,-225.824],[1,0,0,0],
0.603256271,0.495596567,0.345635147]]
```

5.5 Desenvolvimento das trajetórias dos robôs

Com a escolha de todos os componentes a implementar na célula de robótica, torna-se possível o desenvolvimento da trajetória.

5.5.1 Tipos de movimentos

O RAPID possui dois tipos de movimento essenciais ao desenvolvimento deste projeto: MoveL e MoveJ.

O MoveL é utilizado para mover o TCP linearmente até ao seu destino. O MoveJ é utilizado para movimentar o manipulador robótico rapidamente de um ponto para outro, quando esse movimento não necessita de ser realizado em linha reta. Os eixos movem-se para a posição programada através de uma trajetória não linear, atingindo a posição programada todos ao mesmo tempo (ABB, 2010).

Estes movimentos possuem alguns parâmetros essenciais: a velocidade indica a velocidade do movimento do robô; a zona descreve o tamanho da curva da trajetória gerada; o *workobject* indica qual o sistema de coordenadas a utilizar.

5.5.2 Robô extrator

Na definição da trajetória da extração da peça formada na máquina injetora existem determinados pontos que são fulcrais, tais como o número de *targets*, as singularidades e a suavidade do movimento, que são essenciais para o tempo de ciclo do processo.

Explica-se, de seguida, o processo utilizado para a definição da trajetória do molde centrado da Célula C. Este procedimento foi utilizado, também, para o molde descentrado e para as sete células implementadas.

Para a trajetória realizada pelo robô extrator foram definidos dois *workobjects* por célula robotizada, situados no centro do pedestal, um para a trajetória relativa ao molde descentrado e outro para o centrado. A utilização de *workobjects* no RobotStudio é essencial: todos os *targets* configurados para certa trajetória são associados a um determinado *workobject*, fazendo com que, se for necessária alguma alteração de posição do pedestal, não seja necessário redefinir-se todos os pontos que compõem a trajetória.

Posição inicial - Máquina injetora

É essencial existir uma noção de qual é a distância entre moldes, porque é onde ambos os manipuladores robóticos vão realizar parte das suas trajetórias. Para se definir essa distância, realizou-se a trajetória dos robôs dentro da máquina, sem que ocorresse nenhuma colisão, sendo que esta depende, também, do tamanho da peça formada na máquina, visto que esta será extraída.

Como se pode observar na Figura 5.16, para o molde centrado, a máquina injetora presente na Célula C apresenta uma abertura máxima de 1176 mm, com uma distância entre moldes de 637 mm.

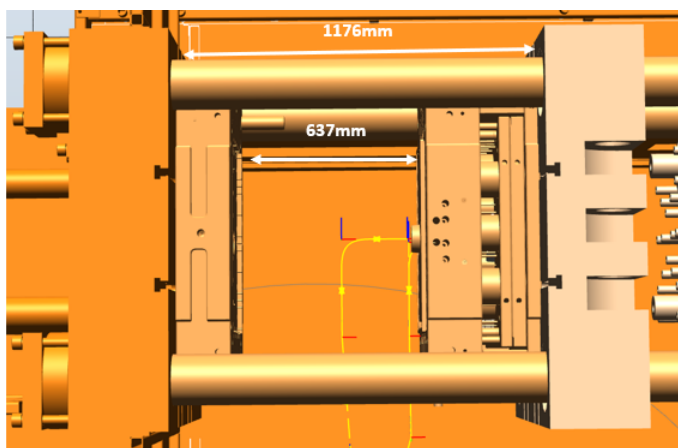


Figura 5.16: Abertura dos pratos da máquina com o molde de tipo centrado.

Foi realizado o mesmo processo, para escolha da abertura dos pratos, nas sete células a implementar. A Tabela 5.8 indica as aberturas e distâncias entre moldes das sete células robotizadas.

Tabela 5.8: Distâncias entre os pratos e os moldes nas células.

Célula	Injetora	Centrado		Descentrado	
		Pratos	Moldes	Pratos	Moldes
A	1600 t	1385 mm	900 mm	1687 mm	953 mm
B	950 t	1148 mm	611 mm	1148 mm	610 mm
C	750 t	1176 mm	637 mm	1526 mm	822 mm
D	700 t	1148 mm	610 mm	1148 mm	597 mm
E1	560 t	1100 mm	535 mm	1467 mm	629 mm
E2	560 t	1100 mm	535 mm	1467 mm	629 mm
F	500 t	1100 mm	606 mm	1042 mm	608 mm

A escolha da posição inicial é essencial, visto que o manipulador robótico retorna a esta posição após atingir o último ponto da trajetória ou se ocorrer algum erro, sendo necessário um retorno suave e sem colisões. Assim, todas as posições iniciais das sete células foram definidas da mesma forma, como demonstra a Subfigura 5.17a, que ilustra o exemplo da Célula C, com o IRB 4600.

Como se pode observar, a junta cinco do robô encontra-se aproximadamente a 90°. Esta posição torna-se útil, porque após o robô atingir o seu último *target*, quando regressa à posição inicial, o *gripper* encolhe-se, tornando mais fácil o seu retorno à posição de início de ciclo.

Com a opção *Mechanism Joint Jog*, do RobotStudio, é possível visualizar-se o ângulo em que cada junta se encontra em determinado momento. O parâmetro CFG indica os valores atuais da configuração das juntas, sendo o primeiro número relativo ao eixo um, o

segundo ao eixo quatro, o terceiro ao eixo seis e o quarto valor é utilizado para se selecionar uma das oito possíveis posições do manipulador robótico (ABB, 2010).

O CFG é essencial para se conseguir colocar o manipulador robótico a realizar um movimento suave. Quando se desloca o robô para um determinado ponto, é possível testar-se as diversas configurações que as juntas conseguem realizar, sendo que, de ponto para ponto, os valores da CFG não devem variar muito, porque isto significa que o manipulador robótico mantém as configurações das juntas semelhantes ao ponto anterior.

Com a posição inicial definida é necessário, agora, deslocar-se o manipulador robótico para dentro da injetora, para que possa realizar a extração da peça formada pela máquina. Quando a porta da injetora abre, o robô inicia a sua movimentação, movendo a junta cinco para uma posição perto dos 0° para que possa entrar na máquina, sem colidir com as colunas existentes, e extrair a peça. A Subfigura 5.17b ilustra a posição em que o robô se encontra após a extração.

É importante que o *target* definido na posição inicial seja do tipo MoveJ para que o manipulador robótico consiga voltar a este ponto de qualquer posição em que se encontre. Todos os movimentos onde não seja necessário um elevado nível de precisão da trajetória devem ser do tipo MoveJ. Esta movimentação é mais rápida do que a linear e, se ocorrer algum tipo de erro durante a produção, com as devidas configurações, o robô pode retornar à posição de início de ciclo de forma mais simples, sem ser necessária a assistência de um operador.

Na extração da peça da máquina injetora da Célula C, para o molde centrado, foram definidos cinco *targets*.

Na Secção C.1 do Anexo C encontram-se tabelados os *targets* criados.

Máquina injetora - Matriz de sensores

Após o manipulador robótico retirar a peça formada de dentro da injetora, tem de realizar a aferição da mesma, ou seja, verificar, na matriz de sensores, se a peça se encontra em conformidade com o pretendido. A posição definida para a matriz de sensores permite ao robô realizar uma movimentação suave para a posição ilustrada na Subfigura 5.17c.

Nesta trajetória foram definidos três pontos. Na Secção C.2 do Anexo C encontram-se tabelados os *targets* criados.

Matriz de sensores - Tina de água

Após a verificação da peça, é necessário realizar-se o seu arrefecimento na tina de água. O manipulador robótico é deslocado até a posição observada na Figura 5.17d, onde, de seguida, se move para dentro da tina. Dentro de água são definidos três pontos, sendo que dois foram criados para ocorrer um movimento oscilatório que permita à peça arrefecer. Após o movimento oscilatório, o robô desloca-se para a posição ilustrada na Figura 5.17f. Nesta trajetória foram definidos seis pontos. Na Secção C.3 do Anexo C encontram-se tabelados os *targets* criados.

As imagens seguintes ilustram a trajetória realizada pelo manipulador robótico IRB 4600, da Célula C, com a peça formada pelo molde centrado, da máquina injetora até à tina de água.

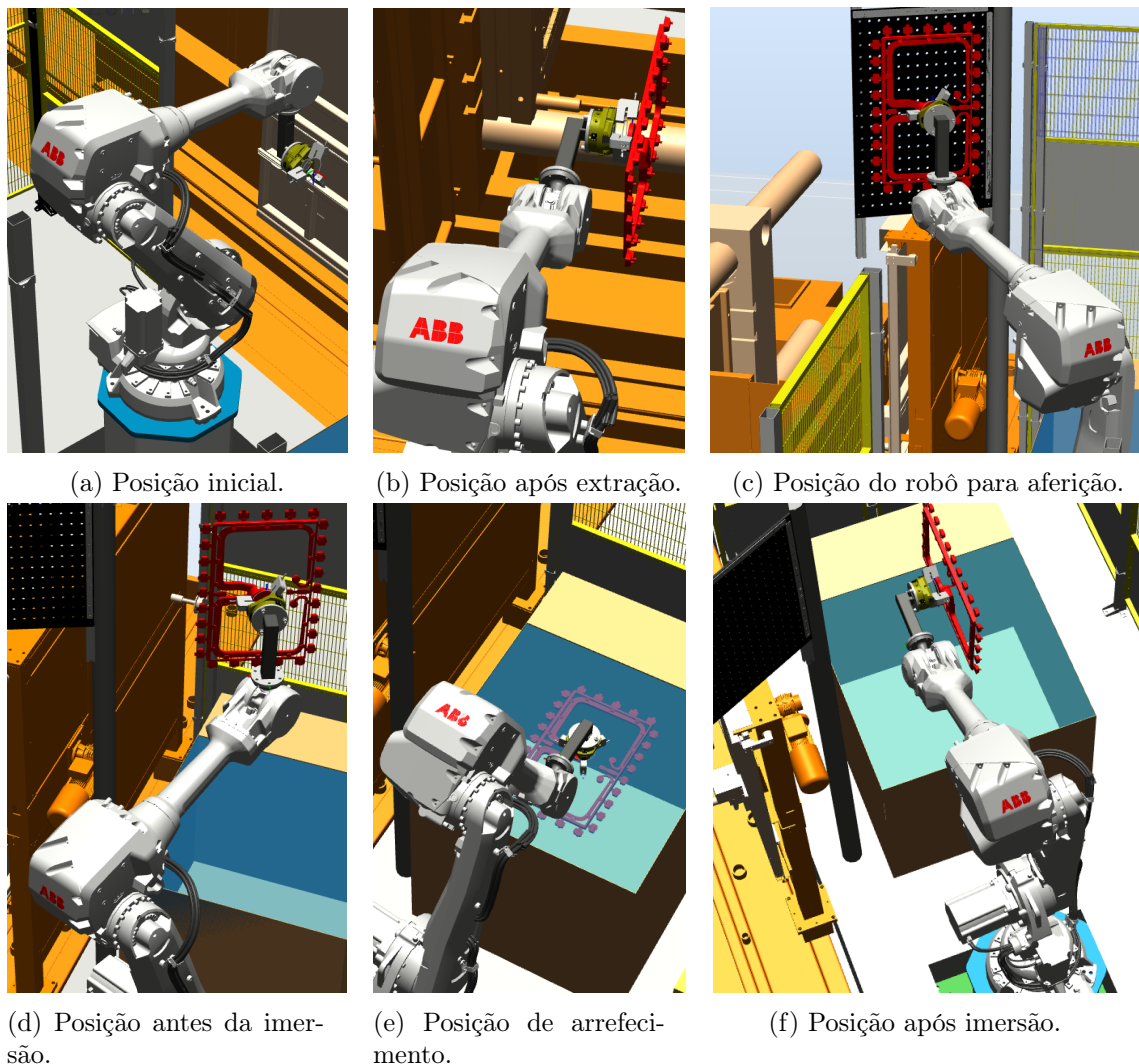


Figura 5.17: Trajetória, até à tina de água, do robô extrator da Célula C.

Após o manipulador robótico atingir a posição da Subfigura 5.17f, existem três caminhos diferentes que pode percorrer, como descrito no fluxograma da Figura 5.1, dependendo do ciclo a ocorrer ou do resultado da matriz de sensores.

Tina de água - Prensa - Posição inicial

A Figura 5.18 ilustra a trajetória percorrida pelo robô quando a peça se encontra de acordo com o esperado. O robô, que se encontrava na posição após o arrefecimento na tina de água, desloca-se para a posição à frente da prensa, observada na Subfigura 5.18a. De seguida, o manipulador robótico entra na prensa, pousando a peça na posição ilustrada na

Subfigura 5.18b. Após largar a peça, desloca-se para fora da prensa e retorna à posição inicial.

Nesta trajetória foram definidos quatro pontos. Na Secção C.4 do Anexo C encontram-se tabelados os *targets* criados.

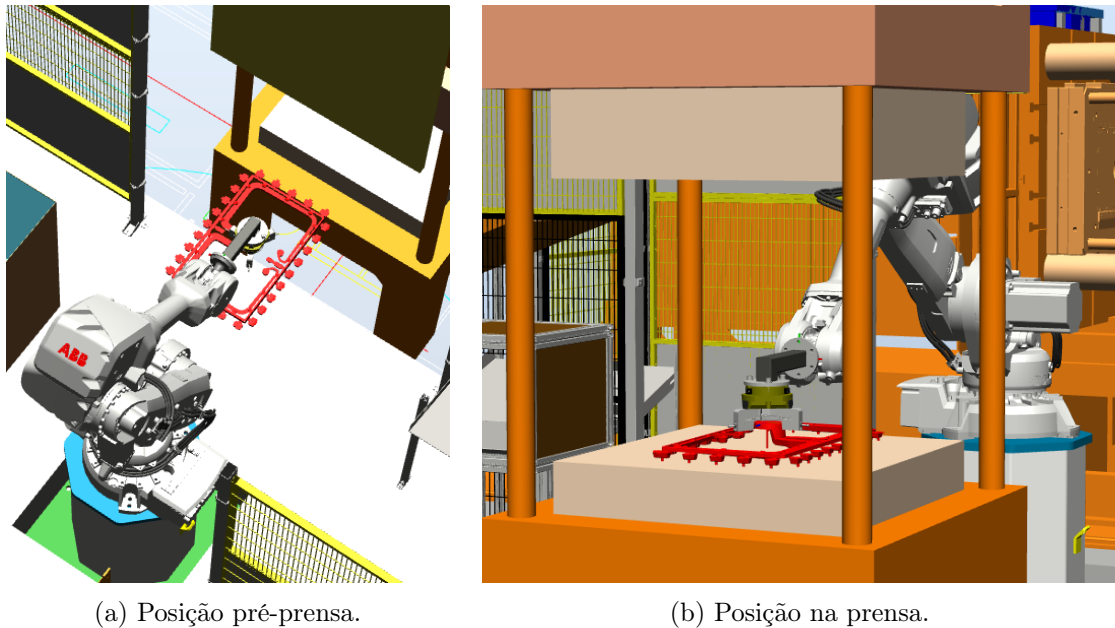


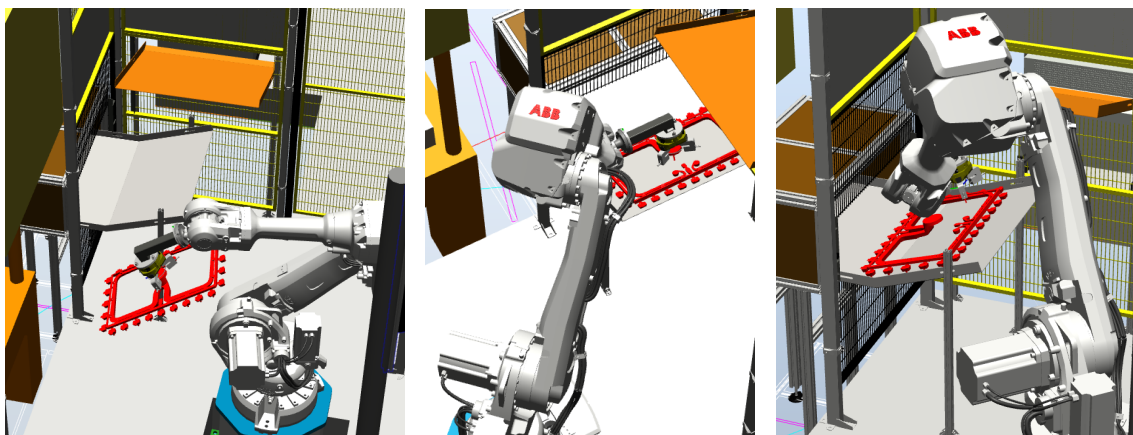
Figura 5.18: Trajetória, para a prensa, do robô extrator da Célula C.

Tina de água - Rampa de inspeção - Posição inicial

O robô, que se encontrava na posição após o arrefecimento da peça na tina de água, é movimentado para uma posição que lhe permita atingir a rampa de inspeção, observada na Subfigura 5.19a. De seguida, é deslocado até à rampa de inspeção, sendo realizado um movimento para a frente, ilustrado na Subfigura 5.19b, que permite empurrar uma peça, se alguma se encontrar parada na rampa desde um ciclo anterior.

Após esta posição, o robô realiza um movimento para cima, observado na Subfigura 5.19c, partindo, de seguida, para a posição anterior, à frente da prensa, voltando, depois, para a posição de início de ciclo.

Nesta trajetória foram definidos cinco pontos. Na Secção C.5 do Anexo C encontram-se tabelados os *targets* criados.



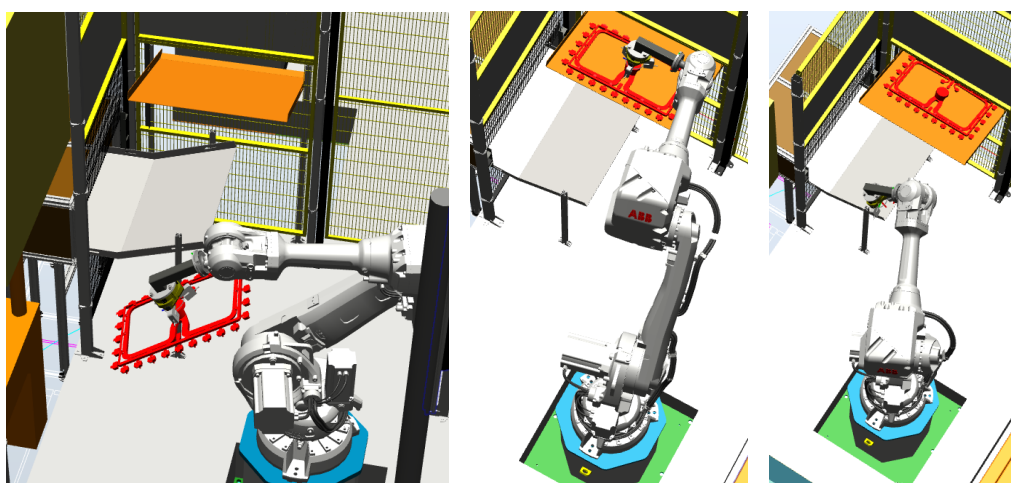
(a) Posição antes da rampa de inspeção. (b) Posição de colocação na rampa de inspeção. (c) Posição de saída da rampa de inspeção.

Figura 5.19: Trajetória, para a rampa de inspeção, do robô extrator da Célula C.

Tina de água - Rampa NOK - Posição inicial

Se a matriz de sensores indicar que a peça não se encontra em conformidade, o manipulador robótico efetua a trajetória ilustrada na Figura 5.20. O robô é deslocado para uma posição semelhante à da rampa de inspeção, antes de pousar a peça na rampa NOK, ilustrada na Subfigura 5.20a, movendo-se, de seguida, para a rampa, como se pode observar na Subfigura 5.20b, onde larga a peça, realizando, também, um movimento para a frente que permite empurrar uma peça, se alguma se encontrar presa. Após pousar a peça, desloca-se para uma posição, ilustrada na Subfigura 5.20c, que vai permitir ao robô retornar à posição inicial.

Nesta trajetória foram definidos seis pontos. Na Secção C.6 do Anexo C encontram-se tabelados os *targets* criados.



(a) Posição antes da rampa NOK. (b) Posição de colocação na rampa NOK. (c) Posição de saída da rampa NOK.

Figura 5.20: Trajetória, para a rampa NOK, do robô extrator da Célula C.

5.5.3 Robô lubrificador

A trajetória de limpeza dos moldes da máquina injetora tem de cobrir toda a sua área. Nas células mais pequenas, D, E1, E2 e F, foram definidas trajetórias em forma de U, visto que o tamanho dos moldes era pequeno o suficiente. Nas células A, B e C foram definidas trajetórias em forma de S, dado que o tamanho já era maior. Todos os deslocamentos para os *targets* definidos foram do tipo MoveJ. Na Figura 5.21 encontram-se ilustrados três dos catorze pontos definidos na trajetória do molde centrado da Célula C.

Foi definido um *target* para a posição inicial, que espera pelo ciclo de lubrificação, encontrando-se ilustrado na Subfigura 5.21a. De seguida, definiu-se um ponto antes da entrada do manipulador robótico dentro da máquina injetora, como se pode observar na Subfigura 5.21b. A Subfigura 5.21c ilustra o ponto mais distante que o robô atinge em toda a sua trajetória. Toda a movimentação do robô é suave, sem movimentos bruscos nem passagens por singularidades.

Na Secção C.7 do Anexo C encontram-se tabelados os *targets* criados.

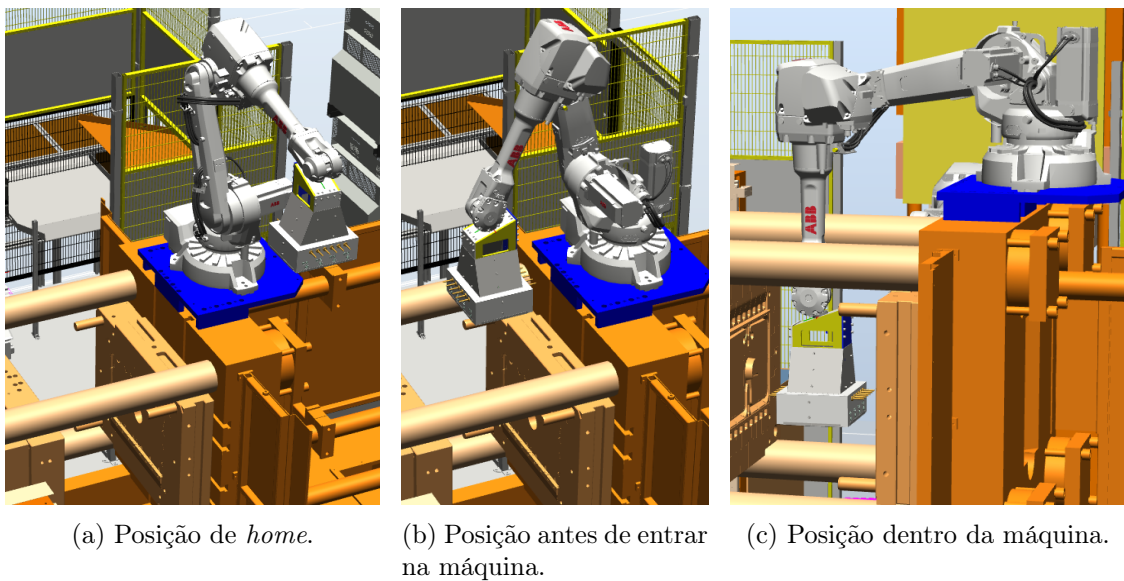


Figura 5.21: Trajetória para limpeza do molde centrado da Célula C.

5.6 Conclusão do capítulo

Este capítulo inicia a descrição do desenvolvimento das sete células robotizadas, sendo descrito o problema a resolver com a implementação deste projeto, fazendo-se, de seguida, a descrição, de forma geral, do processo realizado por ambos os manipuladores robóticos presentes em cada célula. A primeira tarefa realizada na implementação do projeto foi o desenvolvimento do *layout offline* das sete células robotizadas, tarefa fundamental para validação de cada componente.

Selecionaram-se os manipuladores robóticos que realizam a extração da peça da máquina injetora e os que a lubrificam, sendo que este processo foi efetuado com a análise dos *datasheets* dos robôs e com a utilização do ABB RobotStudio. Validaram-se os atuadores finais, testando-se, de seguida, com o *software* RobotLoad, se colocavam, ou não, os manipuladores robóticos em sobrecarga.

Explicaram-se os dois tipos de movimentos utilizados na criação dos pontos, MoveL e MoveJ. Descreveram-se as aberturas dos pratos das sete máquinas injetoras. Referindo-se, depois, a criação de todos os *targets* que definiram a trajetória dos manipuladores robóticos, utilizando-se a Célula C como referência. Foram ilustradas as posições mais relevantes da trajetória do robô extrator e do lubrificador.

Capítulo 6

Desenvolvimento do código e implementação das células

Neste capítulo efetua-se a descrição da implementação das células robotizadas. Demonstra-se a arquitetura geral do sistema e como os componentes principais das células implementadas se encontram interligados. Para se obter uma boa compreensão do código desenvolvido para os robôs são utilizados diversos fluxogramas que explicam a interação entre estes, a máquina injetora e a prensa.

É demonstrada a implementação da Célula C, através de diversas imagens, e explicado o processo necessário à comunicação entre os vários componentes. Para existir o correto funcionamento das células são referidas as verificações e cuidados a ter pelos operadores que as vão supervisionar. Depois, explicitam-se os testes realizados aos componentes das células.

Por fim, é realizado um estudo relativo aos tempos de ciclo do processo, utilizando, como referência, a Célula C.

6.1 Arquitetura do sistema

A Figura 6.1 ilustra a arquitetura do sistema. Os componentes principais de cada uma das células de robótica são ambos os robôs, a máquina injetora e a prensa. A máquina injetora é o *master* de toda a célula, sendo o componente onde são dadas as ordens de execução dos processos de formação da peça. Os dois robôs e a prensa são *slaves*, interagindo com o seu *master*, de forma a realizar o ciclo de trabalho necessário ao funcionamento da célula. O tipo de comunicação utilizada entre os aparelhos e os robôs é o PROFINET (ilustrado com as setas verdes). A troca de sinais entre os robôs é realizada através de Ethernet (ilustrado com a seta azul). Isto é essencial para que haja coordenação entre ambos.

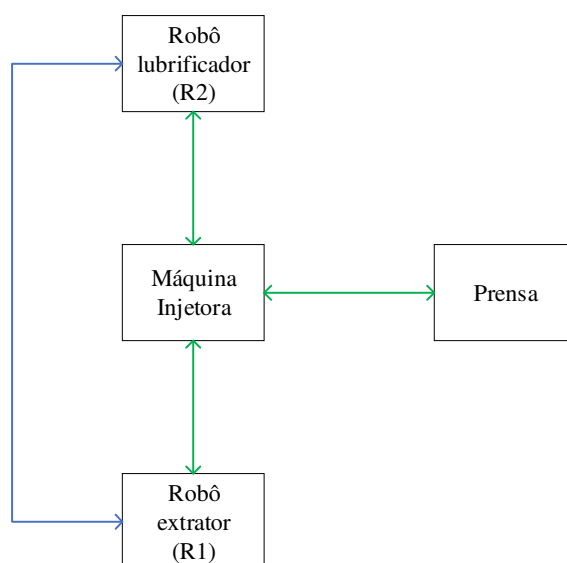


Figura 6.1: Arquitetura do sistema.

6.2 Desenvolvimento do código dos robôs

Esta secção destina-se à explicação do código do programa desenvolvido, através de fluxogramas. Os sinais digitais configurados e utilizados na programação dos robôs encontram-se tabelados no Anexo D.

Para se desenvolver o algoritmo de cada manipulador robótico foi necessário receber-se informação, por parte do cliente, de que tipo de informação o PLC da máquina injetora necessita relativamente ao comportamento dos robôs, visto que este é o *master* das células implementadas.

6.2.1 Porta de entrada da célula

Antes de se iniciar a explicação do algoritmo desenvolvido para cada manipulador robótico, é essencial referirem-se os botões, com os respetivos sinais digitais associados, encontrados na porta de cada uma das sete células implementadas.

Cada célula possui um conjunto de botões, ao lado da porta de entrada, ilustrados na Figura 6.2, que interagem com o ciclo de produção. O botão vermelho foi associado a um sinal de entrada do sistema, com a ação *PP to Main*, ou seja, quando acionado, coloca o ponteiro do programa do robô na primeira linha do código. O botão verde foi associado a um sinal de entrada do sistema, com a ação *Motors On and Start*, ou seja, quando acionado, liga os motores do robô e inicia o programa RAPID onde o ponteiro se encontra. O botão laranja foi associado a um sinal de entrada do sistema, com a ação *Reset Emergency Stop*, que efetua o *reset* a qualquer emergência que esteja acionada, sendo que só assim os motores poderão ser ligados novamente. O botão azul destina-se à abertura da

porta da célula, que, quando pressionado, a destranca, ocorrendo um corte no circuito de segurança dos robôs, originando a sua paragem.



Figura 6.2: Botões de emergência das células.

Todos estes sinais de entrada digitais associados aos botões da porta foram configurados como entradas do sistema (*System Inputs*). Independentemente da fase do processo onde os robôs se encontram, estes sinais, quando ativados, efetuarão a sua ação.

Para o PLC da máquina injetora obter informação sobre uma situação de alarme dos manipuladores robóticos, foram definidos dois sinais de saída de sistema (*System Outputs*).

O circuito de segurança do robô encontra-se no quadro elétrico, instalado pela RobotSol, em cada uma das células.

6.2.2 Robô extrator

O fluxograma do programa principal do R1 é extenso, tendo sido, portanto, dividido em diversos fluxogramas. Na Figura 6.3 encontra-se o início do programa do robô extrator.

Para se iniciar o programa tem de se ativar o botão vermelho, que coloca o ponteiro na primeira instrução da *main*, e em seguida, o botão verde, que liga os motores dos robôs e inicia o programa. No início do ciclo é realizado um *reset* a diversos sinais de saída digitais enviados por R1 para a máquina injetora e para R2, sendo, depois, o robô colocado na posição inicial. De seguida, ocorre a abertura das pinças da garra de R1.

Após a abertura da garra, o robô fica a aguardar pela informação necessária relativa à máquina injetora e, também, pelo sinal que confirma a existência de pressão de ar suficiente para o correto funcionamento do seu *gripper* (enviado por um sensor no quadro de fluidos presente em cada célula). Depois da verificação anterior, o manipulador robótico aguarda por dois sinais de entrada, vindos da máquina injetora, para que possa iniciar o seu ciclo.

O círculo com o número 1 indica a interligação deste fluxograma com o próximo, ilustrado na Figura 6.4.

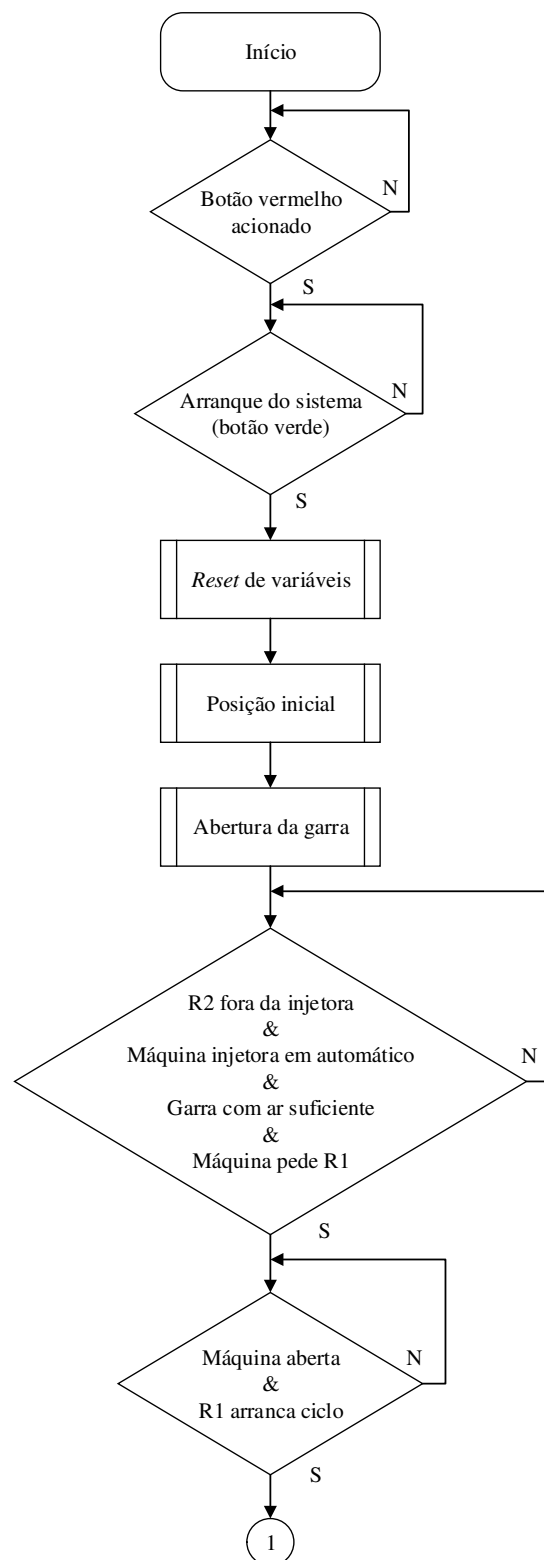


Figura 6.3: Início do programa principal do R1.

A Figura 6.4 ilustra, em forma de fluxograma, a segunda parte programa principal do R1. Após a confirmação das condições anteriores, o robô inicia o processo de remoção da

peça da máquina. Primeiramente, realizou-se um *reset* de sinais digitais de saída: do sinal que indicava início de ciclo (enviado para a injetora), do sinal que indicava que o robô estava na posição inicial e do que indicava que se encontrava fora da máquina injetora (enviados para a máquina injetora e R2).

Após o *reset* dessas variáveis, o robô desloca-se para a posição configurada que permite a remoção da peça, efetuando-se uma redução na sua aceleração durante este processo para que, quando este efetua a paragem no ponto, não ocorra um movimento oscilatório. De seguida, é utilizada uma função do RAPID, o *SoftAct*, que permite ao robô não resistir a uma força exterior, fazendo com que não ocorra uma colisão, possibilitando-lhe ceder aos extratores da máquina injetora que colocam a peça disponível para ser retirada.

Em seguida, é realizado o fecho da garra, que segura a peça, para depois os extratores serem ativados. Para este processo foi utilizada a função *CRobT*, que lê a posição atual do robô. Assim, quando os extratores são acionados, o manipulador robótico, como se encontra com o *SoftAct*, cede, movendo-se para trás. Como consequência, torna-se necessário definir um *target* nessa nova posição para o robô continuar a sua trajetória.

O círculo com o número 2 indica a interligação deste fluxograma com o próximo, ilustrado na Figura 6.5.

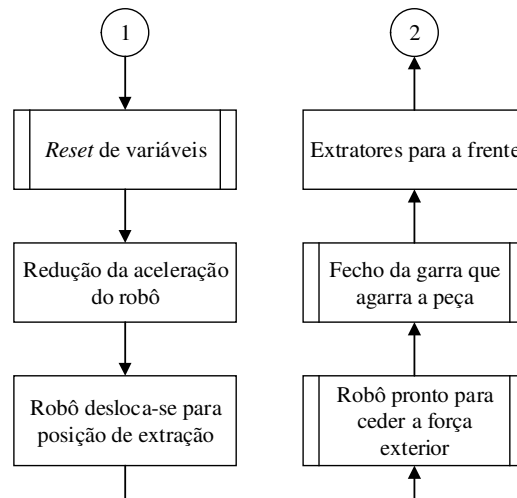


Figura 6.4: Segunda parte do fluxograma principal do R1.

A Figura 6.5 ilustra a terceira parte do programa principal do R1. Após a ativação dos extratores, que permitem ao robô pegar na peça, é realizada uma verificação para confirmar que não ocorreu nenhum erro. Depois, com o *SoftDeact*, o robô é novamente configurado para não ceder a forças exteriores. Por fim, se os extratores foram ativados, o robô sai da máquina injetora, com a peça, e continua o seu ciclo. Se o ciclo foi cancelado, este sai da máquina injetora, tendo aberto a garra previamente.

O círculo com o número 3 indica a interligação deste fluxograma com o próximo, ilustrado na Figura 6.6.

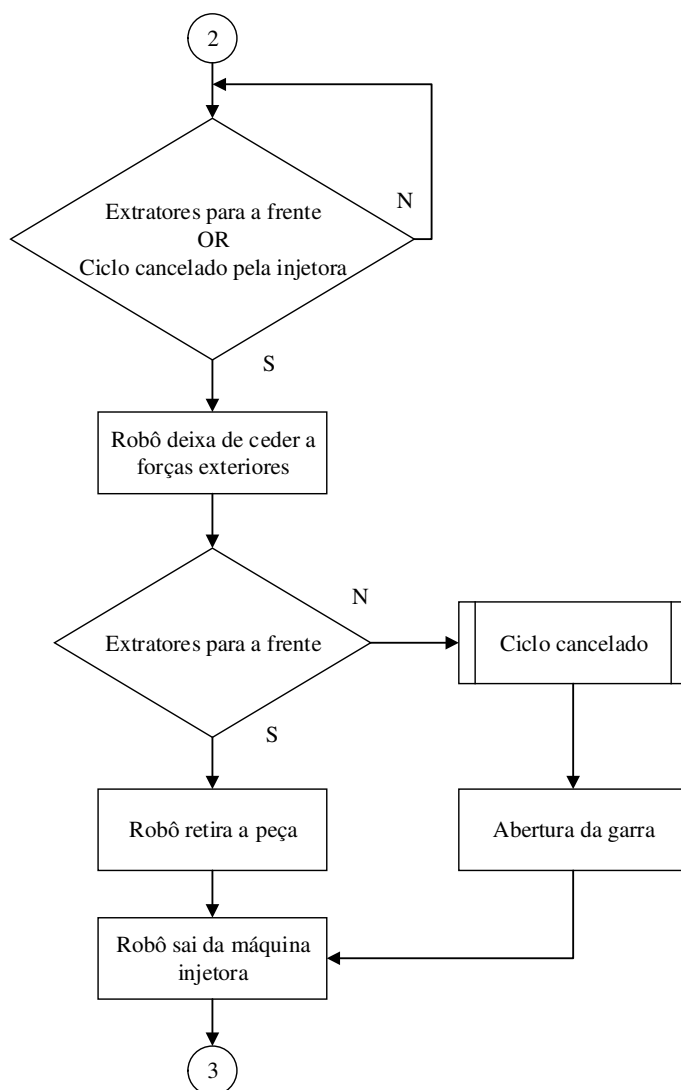


Figura 6.5: Terceira parte do fluxograma principal do R1.

A Figura 6.6 ilustra a quarta parte do fluxograma principal do R1. Após o robô extrator sair da máquina injetora, se tiver ocorrido o cancelamento do ciclo de trabalho, é ativado o sinal digital relativo ao botão vermelho, ficando o robô à espera de novo ciclo. Se a peça foi extraída o ciclo continua. Após a extração da peça é ativado o sinal de saída que indica que o robô se encontra fora da máquina injetora. É com este sinal que R2 sabe que o R1 já não se encontra dentro da injetora. Após atingir um determinado *target*, realiza-se o fecho da porta da máquina. Quando o manipulador robótico atinge a matriz de sensores, onde se encontram oito sensores que detetam a peça, é verificado se todos foram ativados.

O círculo com o número 4 indica a interligação deste fluxograma com o próximo, ilustrado na Figura 6.7.

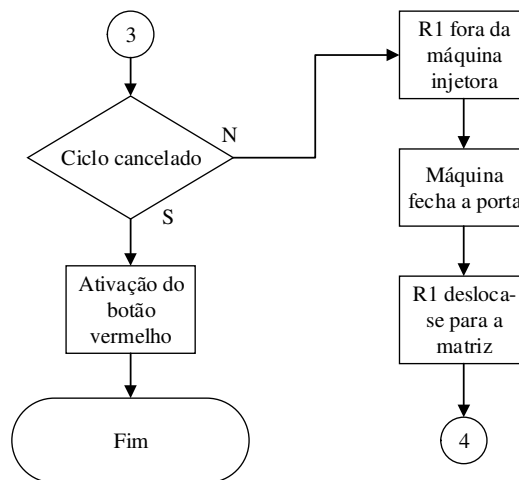


Figura 6.6: Quarta parte do fluxograma principal do R1.

Na Figura 6.7 encontra-se a quinta parte do fluxograma do programa principal do robô extrator. A seguir à aferição da peça, se esta se encontrar em conformidade, é realizado o fecho dos pratos da máquina. Se a peça for NOK, o fecho dos pratos da injetora não é autorizado, visto que podem existir vestígios de peça presos nos moldes. Após a verificação da condição da peça, esta desloca-se para a tina de água.

O círculo com o número 5 indica a interligação deste fluxograma com o próximo, ilustrado na Figura 6.8.

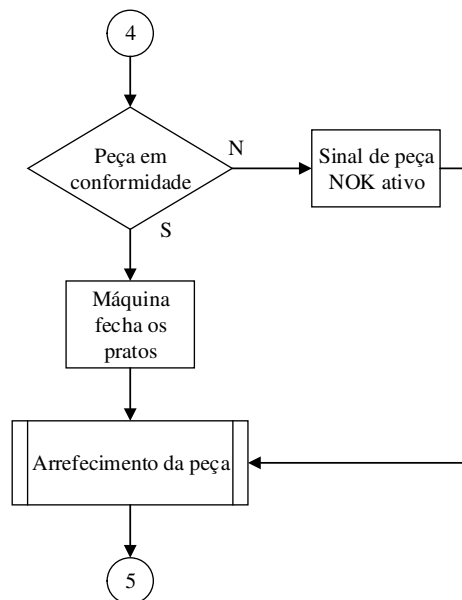


Figura 6.7: Quinta parte do programa principal do R1.

Na Figura 6.8 encontra-se a sexta parte do fluxograma do programa principal do robô extrator. Depois do arrefecimento é realizada uma verificação com duas condições relativas à prensa. Verifica-se, também, se a peça se encontra em conformidade e qual o tipo de

ciclo que está a ocorrer. Após estas verificações, o ciclo ou continua para a prensa ou para as rampas.

O círculo com o número 6 indica a interligação deste fluxograma com o próximo, relativo aos ciclos das rampas, ilustrado na Figura 6.9.

Se as verificações indicarem ser um ciclo de prensa, o manipulador robótico inicia essa rotina, realizando as verificações necessárias. Depois, o robô entra e pouisa a peça, saindo em seguida, sendo ativado o sinal de saída para indicar que este saiu. Por fim, retorna à posição inicial do ciclo, onde é ativado um sinal que indica novo início de ciclo (necessário para o programa do PLC da máquina injetora).

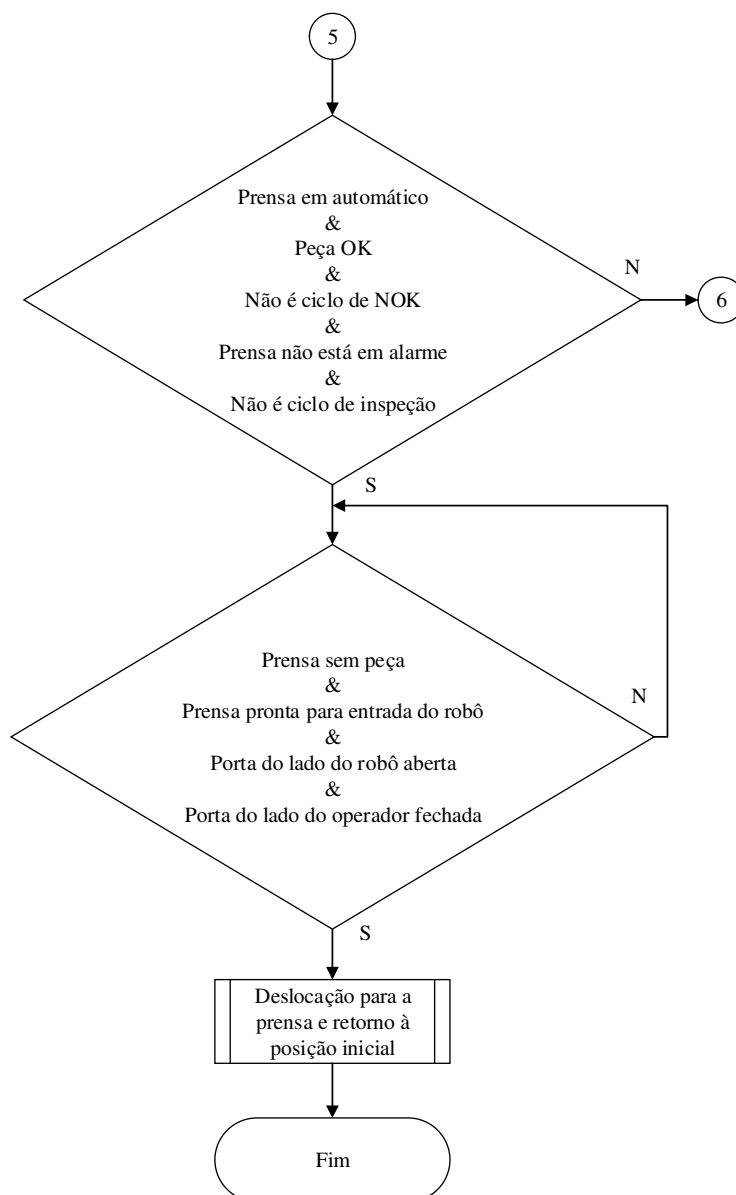


Figura 6.8: Sexta parte do programa principal do R1.

Na Figura 6.9 encontra-se a sétima, e última, parte do fluxograma do programa principal do robô extrator. Se a verificação anterior indicar que se encontra a ocorrer um ciclo de rampas, é verificado para que rampa o robô se irá movimentar. Após as verificações, o manipulador robótico desloca-se para a rampa respectiva e larga a peça, retornando, em seguida, para a posição inicial, aguardando por novo ciclo.

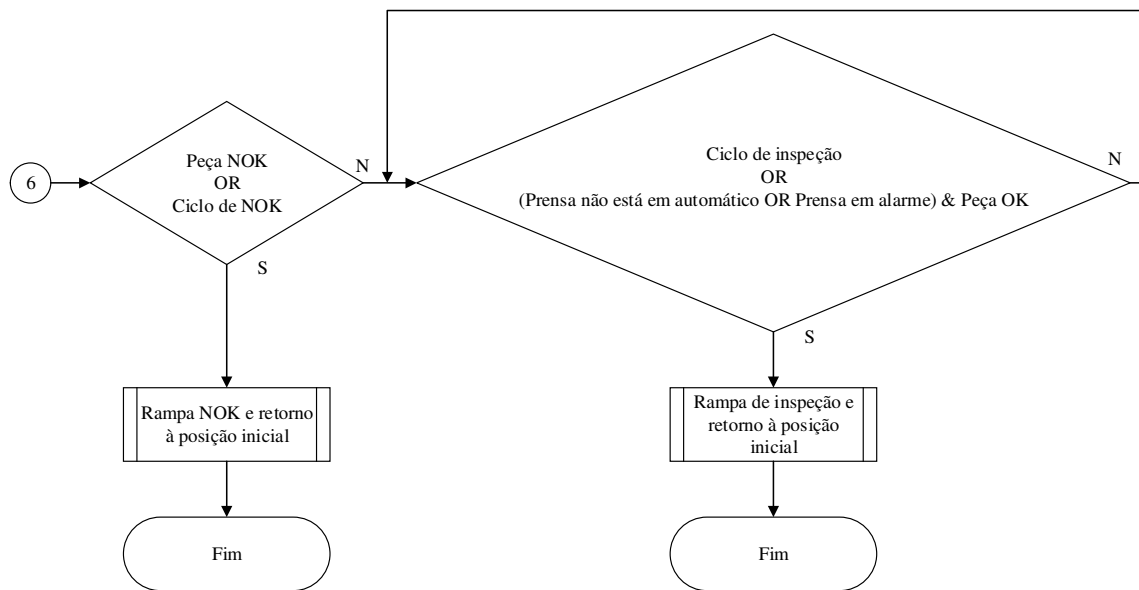


Figura 6.9: Sétima parte do programa principal do R1.

6.2.3 Robô lubrificador

O fluxograma do programa principal do robô extrator é extenso, tendo sido dividido em diversos fluxogramas.

Na Figura 6.10 encontra-se o início do programa do robô lubrificador. Primeiramente, como realizado no programa do R1, é necessário efetuar-se o acionamento dos botões vermelho e verde. Depois, é realizado um *reset* a diversos sinais de saída relacionados com o processo de lubrificação. Em seguida, o robô desloca-se até à sua posição de início de ciclo, sendo que, neste caso, foram criadas zonas de segurança (no RobotStudio), dentro da injetora, que permitem ao robô efetuar o retorno à posição de *home* automaticamente, sem ajuda do operador. Após o retorno à posição inicial, é realizada uma verificação a determinados sinais de entrada.

O círculo com o número 7 indica a interligação deste fluxograma com o próximo, ilustrado na Figura 6.11.

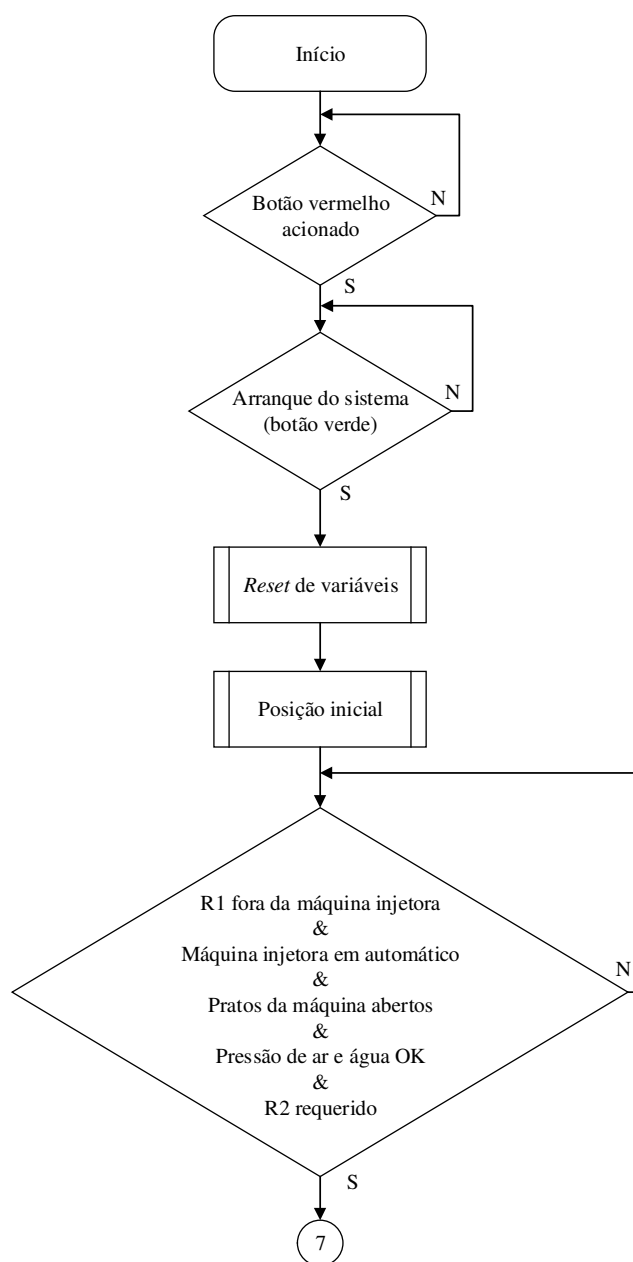


Figura 6.10: Primeira parte do fluxograma do R2.

Na Figura 6.11 encontra-se a segunda parte do fluxograma do programa principal do robô lubrificador. Após a verificação anterior ser validada, é realizada outra verificação: se o manipulador robótico recebeu um sinal de entrada, vindo da máquina injetora, que lhe indica que se pode dirigir para a posição de pré-arranque. Com a ativação deste sinal, é ativado um sinal de saída que permite à máquina injetora saber que o robô atingiu a posição pretendida. Após atingir essa posição, o R2 aguarda pela ordem de início de ciclo de lubrificação.

O processo de lubrificação é iniciado com o *reset* de dois sinais de saída que indicavam que R2 se encontrava fora da máquina injetora. Para este processo, que utiliza ar e água, é

necessário ocorrer a ativação de duas eletroválvulas que se encontram no quadro de fluidos instalado na célula. Estas duas eletroválvulas permitem o fornecimento do ar e da água para o *gripper* do R2, sendo necessário, também, efetuar-se a ativação das respectivas eletroválvulas de cada bico do atuador final (anexadas ao robô) para que o líquido seja expelido. Inicialmente, o robô desloca-se para o molde fixo, onde são ativadas as eletroválvulas responsáveis pela lubrificação desse lado e, também, as eletroválvulas que fornecem o ar e a água. Depois, o manipulador robótico efetua o *reset* dos sinais de saída das eletroválvulas deste lado, finalizando a lubrificação do lado fixo.

O círculo com o número 8 indica a interligação deste fluxograma com o próximo, ilustrado na Figura 6.12.

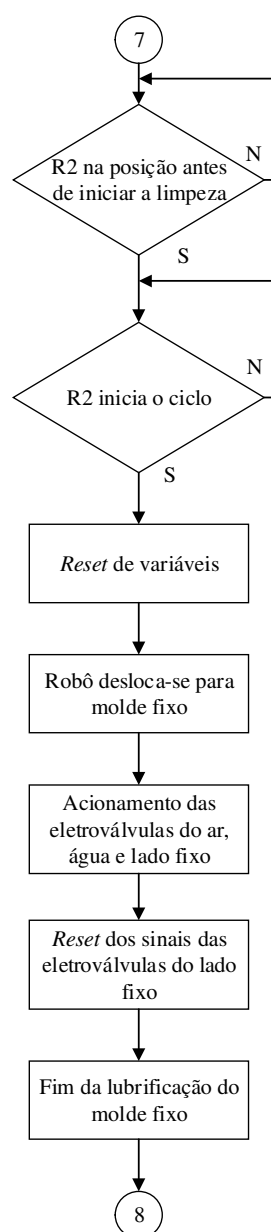


Figura 6.11: Segunda parte do fluxograma do R2.

A Figura 6.12 ilustra a terceira parte do fluxograma do programa principal do R2. Após terminar a lubrificação do molde fixo, o robô desloca-se para o lado móvel, onde aciona as eletroválvulas que são necessárias à lubrificação deste lado, realizando o *reset* destas, e das que forneciam o ar e a água ao atuador final, quando terminar este processo.

Após o processo de lubrificação, o robô ativa um sinal de saída que indica à máquina injetora que pode retornar o pistão de injeção.

O círculo com o número 9 indica a interligação deste fluxograma com o próximo, ilustrado na Figura 6.13.

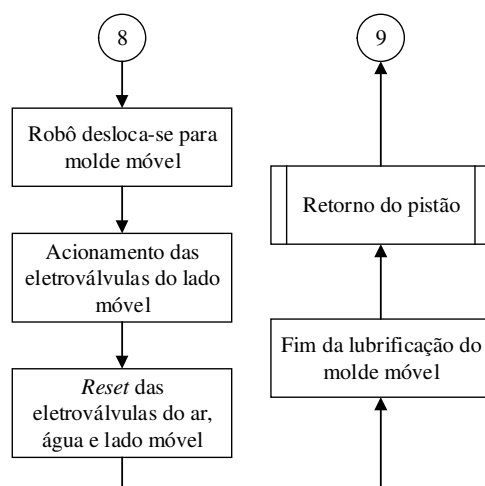


Figura 6.12: Terceira parte do fluxograma do R2.

Na Figura 6.13 encontra-se a quarta parte do fluxograma do programa principal do R2. Depois do retorno do pistão é iniciado o processo de limpeza dos moldes. Este processo é necessário para limpar excessos de água decorrentes do processo anterior.

O processo de limpeza dos moldes realiza-se com a mesma trajetória utilizada na lubrificação. A única diferença neste processo são as eletroválvulas a ativar, as de sopro, que têm a função de enviar ar para o lado pretendido do atuador final.

Quando os processos de limpeza e lubrificação terminam, o robô retorna à posição de pré-arranque. O círculo com o número 10 indica a interligação deste fluxograma com o próximo, ilustrado na Figura 6.14.

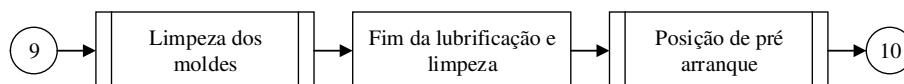


Figura 6.13: Quarta parte do fluxograma do R2.

Na Figura 6.14 encontra-se a quinta, e última, parte do fluxograma do programa principal do R2. Após atingir a posição de pré-arranque, o robô aguarda que a injetora desative dois sinais, para que ocorra o retorno para a posição inicial, encontrando-se preparado para iniciar novo ciclo de trabalho.

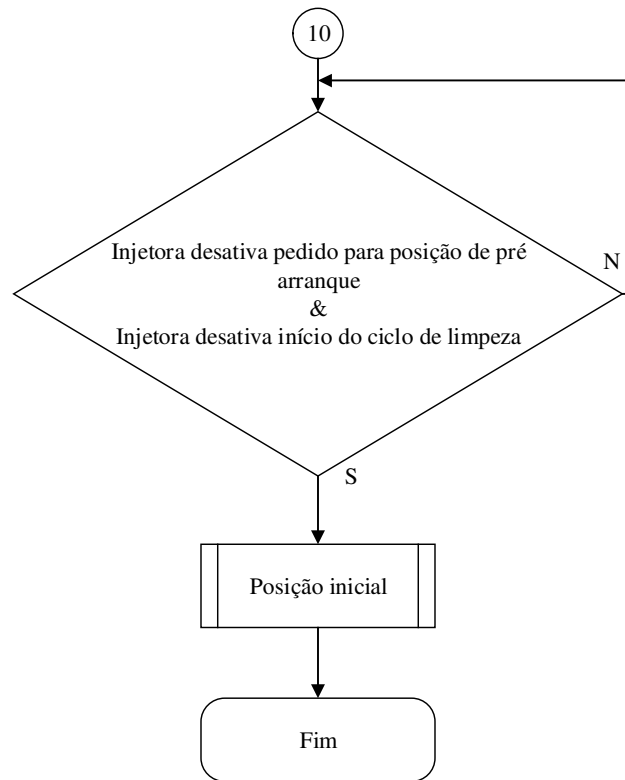


Figura 6.14: Quinta parte do fluxograma do R2.

Dependendo da abertura dos pratos das máquinas injetoras de cada célula, pode ser necessário realizar-se apenas uma trajetória que efetua a lubrificação e limpeza, de ambos os moldes, em simultâneo, como é o caso da Célula 560.

6.2.4 Configuração dos *targets* criados

No Capítulo 5 foi desenvolvida a trajetória de ambos os manipuladores robóticos. Durante o desenvolvimento do programa dos robôs foi necessário incorporarem-se os *targets* criados com o algoritmo. Com isto, foram definidas diversas velocidades para o robô, dependendo do processo a realizar. Foram também configuradas as precisões de cada um dos pontos.

Portanto, foram definidas velocidades para:

1. o processo de extração da peça;
2. o processo de aferição da peça;
3. o processo de arrefecimento da peça;
4. o processo de pousar a peça na prensa, rampa de inspeção e rampa NOK.

Quando é necessário o robô ativar um sinal digital, como se pretende que seja ativo no preciso momento em que é chamado, a zona do *target* da trajetória nesse momento

foi colocada como *fine*. Quando o manipulador robótico se encontra dentro da máquina injetora ou da prensa, ou quando realiza a trajetória de pousar a peça, definiu-se, no parâmetro *zone*, o valor 0, para que o TCP passe exatamente no ponto definido.

6.3 Implementação no cliente

Após o desenvolvimento do código, iniciou-se a implementação no cliente. A Célula C, utilizada como referência nesta dissertação, também será a demonstrada nesta secção.

Para existir o mínimo de erros possíveis entre a passagem da simulação criada no RobotStudio para a célula real, uma empresa necessita de estar em sintonia em todos os seus departamentos, para que não ocorram diferenças significativas. O objetivo mais importante é detalhar as posições de todos os componentes e dispositivos dentro das células, visto que as trajetórias dos manipuladores robóticos são construídas através das posições definidas na simulação. Se existirem divergências nas posições dos objetos, será necessário alterar os *targets*.

É importante salientar que é complicado não ocorrer alteração, na célula real, de pontos definidos nas simulações, porque, mesmo existindo boa comunicação entre os diversos departamentos das empresas, em certos casos, alguns milímetros podem ser o necessário para tal alteração existir, situação que ocorreu neste projeto.

Primeiramente, na implementação das células foi necessário efetuar-se a ligação dos seus componentes. Para a máquina injetora e os controladores dos robôs conseguirem efetuar a troca de sinais, o PLC da máquina tem de instalar o ficheiro GSD fornecido pelos controladores, pois permite à máquina interpretar os sinais recebidos. Em seguida, foi configurado, no RobotStudio, o IP dos controladores relativo ao PROFINET, sendo este o IP definido no PLC da máquina injetora. Foi, também, definido o número de sinais a trocar entre os dispositivos.

Depois, executou-se a trajetória criada no RobotStudio, para se verificar se existe alguma incoerência com a realidade, que se confirmou. Assim, houve necessidade de reajustar alguns *targets* definidos na simulação. Foram alteradas, também, as velocidades dos pontos definidas na simulação, porque revelaram-se diferentes entre esta e a realidade. Após estes pequenos ajustes, os robôs encontram-se prontos para executar as suas funções.

São apresentadas, agora, diversas figuras que ilustram a composição final dos componentes, e das diversas posições dos robôs, na Célula C.

A Figura 6.15 ilustra o robô extrator na sua posição inicial, a aguardar pela formação de uma nova peça. É possível observar-se, também, a disposição da matriz de sensores e da tina de água.

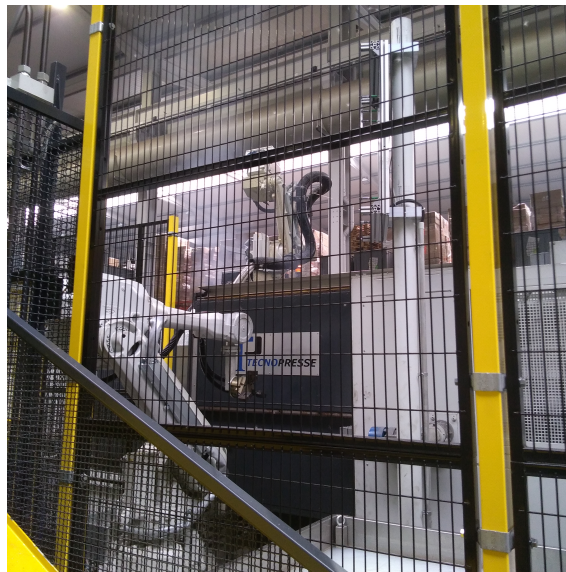


Figura 6.15: Posição inicial do robô extrator.

Relativamente ao robô lubrificador, na Subfigura 6.16a, encontra-se ilustrada a posição inicial deste e na Subfigura 6.16b a posição antes do início do ciclo de lubrificação.



(a) Posição inicial do robô lubrificador.



(b) Posição antes do início do ciclo de lubrificação.

Figura 6.16: Posições do robô lubrificador na Célula C.

Na Subfigura 6.17a, é possível observar-se a disposição final da porta de entrada da Célula C e, também, a rampa destinada a peças NOK. Os botões de emergência desta célula, encontram-se ilustrados na Subfigura 6.17b, sendo essenciais para o controlo e segurança dos ciclos de trabalho.

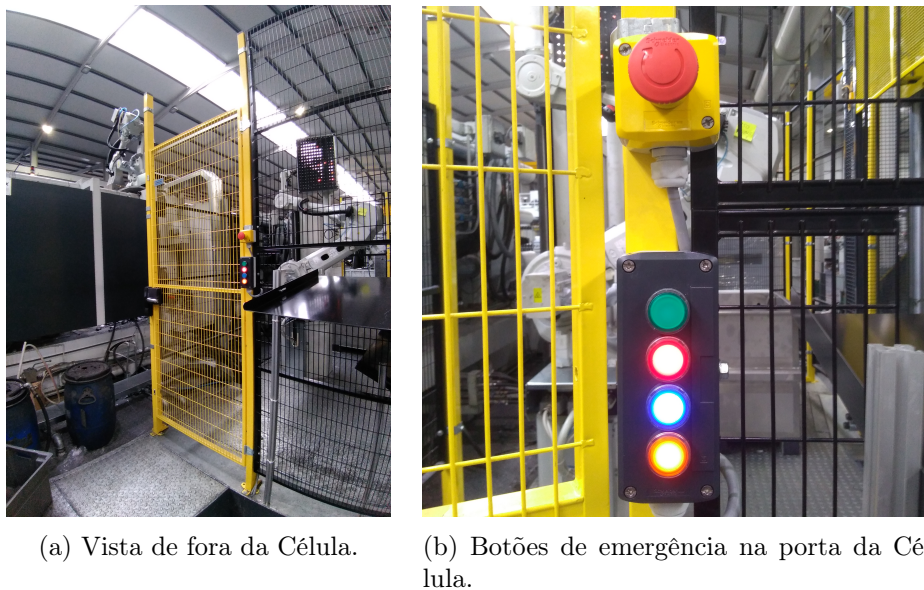


Figura 6.17: Componentes da porta de entrada na Célula C.

6.3.1 Interação entre robôs e operadores

Todas as células implementadas terão a supervisão de um operador humano que monitoriza a situação de cada uma. Um dos processos fundamentais quando se pretende robotizar e automatizar postos de trabalho é fornecer a informação necessária, aos trabalhadores, para o correto funcionamento das células. Com isto, foi desenvolvido, pela RobotSol, um manual que fornece toda a informação necessária aos operadores que vão estar em contacto com os robôs.

Para iniciar o funcionamento das células, o operador que as supervisiona tem de realizar as seguintes verificações:

1. verificar, no quadro de fluidos, ilustrado na Subfigura 6.18a, se as válvulas de corte manual se encontram abertas e se as unidades de tratamento de ar se encontram purgadas e com a pressão entre 6 e 8 bar;
2. verificar se a bomba de água se encontra ligada e operacional, e se o tanque se encontra com água;
3. verificar se as botoneiras de emergência estão desativadas;
4. verificar se ambos os controladores dos robôs se encontram ligados, sem estar em emergência e com ambos os manipuladores robóticos na posição inicial;
5. verificar se todos os periféricos do robô se encontram operacionais (ver Subfigura 6.18b, que demonstra os sensores em funcionamento na matriz);
6. verificar, na porta da célula, se existe algum botão de emergência acionado, se esta se encontra fechada e se a segurança da porta se encontra rearmada (botão laranja);

7. verificar se não existe nenhum operador no interior da célula.

Após estas verificações, colocam-se ambos os robôs em modo automático.



(a) Quadro de fluidos localizado na Célula C.



(b) Matriz de sensores da Célula C.

Figura 6.18: Periféricos da Célula C.

Depois de realizadas as verificações referidas, a célula poderá iniciar o seu funcionamento, efetuando-se o rearme das emergências, pressionando-se o botão vermelho e, em seguida, o botão verde. Se ocorrer uma paragem efetuada pelo botão azul, para uma eventual intervenção na célula, e se se desejar iniciar novamente o ciclo no momento em que este parou, verifica-se se o botão laranja se encontra ativo e, depois, pressiona-se o botão verde.

Se o operador pressionar o botão azul, durante o ciclo de trabalho dos robôs, e desejar que estes reiniciem o seu ciclo, necessita de colocar o R1 numa posição perto da inicial (se necessário), e clicar, de seguida, no botão vermelho, e, depois, no botão verde.

No fim dos ciclos de inspeção e prensa, o operador que se encontrar a supervisionar a célula efetua a remoção da peça com a utilização de luvas.

6.4 Testes realizados

Antes dos manipuladores robóticos serem transportados para o cliente, foram todos montados na RobotSol, com o seu atuador final associado, de modo a serem realizados todos os testes necessários ao correto funcionamento dos robôs. Quando ligados pela primeira vez, foi realizado o ajuste do contador de voltas dos 14 manipuladores robóticos utilizados, colocando-se cada eixo na sua posição de calibração (indicada pelas marcas visíveis nos elos). Configuraram-se, também, as suas cartas de entradas e saídas.

Relativamente ao atuador final do robô lubrificador, foram efetuados testes relativos às eletroválvulas localizadas por cima deste, ilustradas na Figura 6.19. Estas eletroválvulas

estão ligadas aos bicos de lubrificação, ou seja, quando uma delas é acionada, abre o seu bico respectivo e permite a saída do ar e água. As eletroválvulas encontram-se ligadas ao controlador através do cabo de sinal *Serial Measurement Board* (SMB).

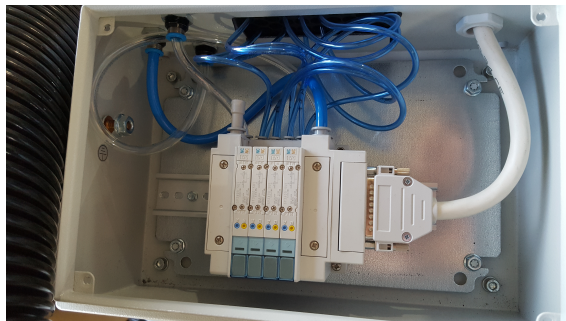


Figura 6.19: Eletroválvulas para o R2 da Célula C.

Para se realizar o teste às eletroválvulas, efetuou-se a ligação de um PC ao controlador do robô, descarregou-se o respetivo programa e sinais digitais criados para este e, depois, com o auxílio do RobotStudio, ativaram-se, uma a uma, as eletroválvulas, verificando-se se estas estariam efetivamente a funcionar. Foi, também, associada corretamente cada eletroválvula ao respetivo bico.

De forma a todos os tubos, de ar e água, chegarem ao atuador final do robô, situado na sua extremidade, foram instalados protetores de tubagem, específicos para a indústria da fundição. Foram testadas diversas posições para os suportes dos protetores, com o auxílio do RobotStudio, visto que não podem limitar a movimentação do manipulador robótico. A posição final destes encontra-se ilustrada na Figura 6.20.



Figura 6.20: *Gripper* de R2 montado.

Foram, também, efetuados testes relativos às garras acopladas aos robôs extratores e aos sensores que foram colocados nas matrizes. O código dos robôs desenvolvido foi

testado através da simulação criada no RobotStudio. Os sinais enviados pelo PLC da máquina injetora, nesta fase de testes *offline*, eram ativados manualmente no programa.

6.5 Tempos de ciclo

Nesta secção encontra-se o estudo efetuado relativamente aos tempos de ciclo nas células implementadas. De salientar que, como os robôs têm de esperar pela formação da peça na máquina injetora, o tempo de ciclo do R1 necessita, apenas, de ser baixo o suficiente para não ser a injetora a esperar pelo robô, mas sim, o contrário.

6.5.1 Tempo de ciclo na simulação

A simulação pode ser utilizada para testar o tempo necessário para o robô realizar os seus movimentos de ponto para ponto dentro da célula, mas possui uma limitação, pois como o PLC da máquina injetora é o *master* da célula, o robô aguarda por sinais desta para realizar movimentos. De forma a mitigar esta situação, com o estudo do tempo de ciclo real, foi adicionado, à simulação, o tempo de abertura dos moldes e da porta da injetora, e, também, o tempo necessário para o robô pegar na peça para realizar a sua extração.

Como se pode observar na Tabela 6.1, que demonstra o tempo de ciclo do R1 da Célula C, para o molde descentrado, os três tipos de ciclo a realizar pelo robô extrator são efetuados em 34s, existindo pouca variação entre ciclos na colocação da peça e retorno à posição inicial. Existe, ainda, um tempo de espera, relativo à formação da peça, de 24s.

Tabela 6.1: Tempo de ciclo do R1 na Célula C com molde descentrado.

	Prensa	Rampa Insp.	Rampa NOK
Tempo de espera	24 s	24 s	24 s
Extração	6 s	6 s	6 s
Aferição	3 s	3 s	3 s
Arrefecimento	19 s	19 s	19 s
Pousar a peça	3 s	4 s	4 s
Posição inicial	3 s	2 s	2 s
Tempo total	58 s	58 s	58 s

No Capítulo 5 referiu-se que foram testadas duas posições para a matriz de sensores. Na posição final da matriz de sensores, o robô efetua a verificação da qualidade da peça em três segundos. Na outra posição testada, verificou-se que o R1 demora cerca de seis segundos. Depreende-se, assim, que o processo de aferição foi reduzido, em tempo, para metade, com a modificação da posição deste componente.

Relativamente ao robô lubrificador, verificou-se que o processo de lubrificação e limpeza, na Célula C, com um molde descentrado, demora cerca de 20s.

6.5.2 Tempo de ciclo real

Após a Célula C se encontrar implementada e em funcionamento no cliente, efetuou-se uma análise relativa aos tempos de ciclo que os robôs realizavam, com um molde descendido, com o diagrama ilustrado na Figura 6.21.

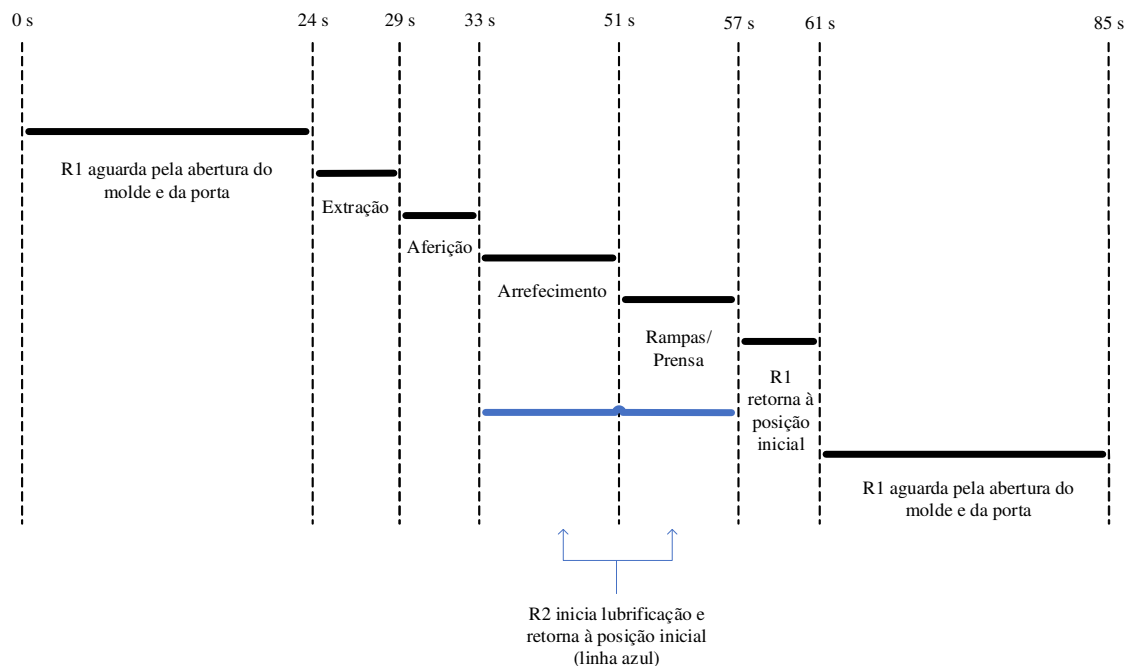


Figura 6.21: Diagrama de tempo do processo dos robôs da Célula C, para molde descendido.

Como se pode observar, o robô extrator encontra-se em espera durante 24s, pela abertura dos pratos e da porta da máquina injetora. Após a abertura, este demora cinco segundos a efetuar a extração da peça que foi formada e quatro segundos a efetuar a verificação se esta se encontra em conformidade ou não. O processo de arrefecimento encontra-se com uma duração de 18s, porque o robô realiza o movimento oscilatório programado, dentro da tina de água, para arrefecer a peça.

Como descrito nos fluxogramas do código desenvolvido, o robô lubrificador pode iniciar a sua função quando o R1 se encontra numa posição onde a porta da máquina injetora pode fechar, sendo que a injetora recebe um sinal, vindo do R1, a indicar que a máquina se encontra livre para o R2 iniciar o seu processo. Com isto, o R2 realiza a lubrificação e limpeza dos moldes quando o R1 inicia o seu processo de arrefecimento da peça, terminando o seu ciclo (com o retorno à posição inicial) quando o R1 atinge a posição de colocação da peça. O ciclo completo de R2 é realizado em 24s.

Após o arrefecimento, o robô extrator desloca-se ou para a prensa, ou para uma das rampas, dependendo do ciclo e do estado da peça, tendo este processo, aproximadamente, uma duração de seis segundos. Após pousar a peça, o R1 retorna à posição de início de

ciclo, ficando a aguardar pela abertura da porta da máquina injetora (novo ciclo). O tempo de ciclo do robô extrator é, portanto, 37 s e possui um tempo de espera de 24 s.

6.5.3 Comparação de resultados

Como se pode observar pelos resultados obtidos no estudo do tempo de ciclo em simulação e na célula real, existe apenas uma diferença de três segundos no processo do robô extrator, e uma diferença de quatro segundos no robô lubrificador. Isto deve-se ao facto de, na simulação, não ser possível obter-se com exatidão a velocidade dos robôs da célula real e, também, ao facto de não existir interação entre os robôs e o PLC da máquina injetora no RobotStudio.

Apesar da ligeira diferença de tempo total, isto não se torna problemático, visto que, como se pode observar pelo diagrama de tempo do processo real, o robô R1 fica 24 s em espera, aguardando pela abertura da máquina injetora, e o R2 fica cerca de 33 s.

6.6 Conclusão do capítulo

Este capítulo descreve a arquitetura do sistema utilizado nas sete células desenvolvidas, referindo-se as comunicações utilizadas para a troca de sinais entre componentes. Depois, foi efetuada uma explicação do código desenvolvido nos 14 manipuladores robóticos que compõem este projeto e a sua interação, tanto com a máquina injetora como com a prensa.

Demonstrou-se a implementação das células através de várias imagens e explicou-se o processo necessário à comunicação entre os vários componentes. Realçou-se a importância da interação entre os robôs e os operadores das células onde estes se encontram inseridos, visto que só assim existe um correto funcionamento dos postos de trabalho. Para isto, os operadores têm de saber realizar as verificações necessárias em cada célula.

Referiram-se os testes efetuados aos componentes das células robotizadas, realizados antes destes serem deslocados para o cliente. Isto é essencial, porque, sendo os testes realizados numa fase pré-cliente, existe uma poupança de recursos da empresa.

Efetuaram-se estudos relativos aos tempos de ciclo dos robôs, utilizando-se a Célula C como referência. Depreendeu-se que a diferença de tempos entre a simulação desenvolvida e a célula real não é um obstáculo, visto que ambos os robôs terminam o seu ciclo e esperam pela formação de uma nova peça para poderem iniciar a sua função novamente.

Capítulo 7

Conclusão

Esta dissertação tinha como objetivo o desenvolvimento de sete células robotizadas, cada uma com dois robôs, para a indústria da fundição, onde os robôs tinham como função substituir o trabalho repetitivo e perigoso dos operadores. Após o estudo realizado, o desenvolvimento da simulação e do código dos robôs, e a implementação da célula, pode-se afirmar que os objetivos propostos para este projeto foram cumpridos.

A robótica industrial demonstra ser essencial em indústrias como a fundição. A automização dos processos não só aumenta o rendimento dos postos de trabalho, mas também fornece aos operadores das células melhores condições. Isto traduz-se numa redução dos problemas de saúde associados ao trabalho repetitivo que realizavam, ao contacto com as altas temperaturas presentes na periferia das máquinas injetoras e à inalação dos resíduos libertados no processo de formação das peças de alumínio.

Antes de se iniciar o desenvolvimento do projeto, foi realizado um estudo relativo à robótica industrial, fazendo-se uma breve introdução a conceitos importantes na robótica. Depois, referiram-se características de desempenho de um robô industrial, tornando-se essencial para se analisar quais os robôs mais indicados para determinadas soluções. É explicada, de forma breve, a cinemática de um manipulador robótico e, de seguida, são referidos diversos tipos de robôs. Para finalizar este primeiro estudo, foram descritos os dispositivos que compõem uma célula robotizada e a sua função.

Efetuuou-se um estudo direcionado à programação de robôs, descrevendo-se dois métodos diferentes, o *online* e o *offline*, e as suas vantagens, realizando-se, depois, uma pesquisa relativa às redes de comunicação industrial, sendo estas um componente essencial na automização de processos. Realizou-se um estudo relativo à robótica na indústria da fundição, referindo-se os processos que decorrem numa célula nesta indústria e a sua interação com os robôs. Foram, também, descritos alguns procedimentos de segurança a ter em conta quando se trabalha na fundição. Como a indústria automóvel se encontra cada vez mais automatizada e a aumentar a utilização de alumínio, foi efetuado um pequeno estudo sobre esta indústria, para se salientar a crescente importância deste material. Para finalizar o estudo teórico, efetuou-se uma pesquisa direcionada a casos de estudo que permitissem a

obtenção de informação relativa a situações de implementação de soluções robotizadas de manuseamento de materiais e aos resultados obtidos.

A realização de todo este estudo teórico, efetuado antes do desenvolvimento do projeto, permitiu a obtenção de conhecimento essencial, não só para a realização desta dissertação, mas também para trabalhos futuros direcionados para a área da robótica industrial.

Após o estudo teórico iniciou-se o desenvolvimento do projeto, começando-se pela criação da simulação das células robotizadas a implementar. Primeiramente, descreveu-se o processo a realizar por ambos os robôs (extrator e lubrificador). Em seguida, foi explicado o processo de criação do *layout* das células. Após a definição do *layout*, referiram-se os manipuladores robóticos escolhidos para executar as funções de extração e lubrificação. Descreveu-se, também, o desenvolvimento dos atuadores finais e os testes efetuados, de modo a que o desempenho dos robôs não fosse prejudicado. Para finalizar a criação da simulação das células robotizadas, foi efetuado o desenvolvimento das trajetórias dos robôs, justificando-se a escolha do tipo de movimento entre *targets* e, de forma a fornecer ao leitor uma melhor visão relativa à movimentação dos robôs, foram utilizadas diversas imagens dos pontos mais importantes por onde estes passam.

Após a criação do *layout* na simulação, realizou-se o desenvolvimento do código. Primeiro foi demonstrada a arquitetura do sistema e o tipo de comunicação efetuado entre os dispositivos, tendo sido, de seguida, explicado o funcionamento dos botões de segurança das células implementadas, localizados na porta de entrada. Depois, através de fluxogramas, descreveu-se o código desenvolvido que permite a interação entre ambos os robôs, a máquina injetora e a prensa. De seguida, demonstrou-se a implementação das células através de várias imagens e referiu-se a importância da interação entre os robôs e operadores, sendo que, só assim, poderá existir um correto funcionamento das células implementadas. Mostram-se, também, os testes efetuados aos diversos componentes dos postos de trabalho.

Para finalizar, realizou-se um estudo relativo aos tempos de ciclo dos manipuladores robóticos, tanto na simulação, como na célula real. Verificou-se uma ligeira diferença nos tempos efetuados pelos robôs em ambos os casos, mas este facto revelou não ser significativo, visto que estes ficam um tempo considerável à espera de novo ciclo.

Uma célula de robótica industrial tem de ser desenvolvida de forma a que seja, de certa forma, escalável e flexível. No caso desta dissertação, por exemplo, cada uma das sete máquinas injetoras possui a capacidade de alterar o molde que forma a peça, ou seja, pode existir uma variância de tamanho e peso. Isto faz com que os robôs extratores, com os seus atuadores finais acoplados, necessitem de possuir a capacidade de carregar peças com ligeiras alterações das pensadas originalmente, e com que os robôs lubrificadores tenham a capacidade de conseguir lubrificar moldes que variem em formato e tamanho.

Relativamente ao *software* de programação *offline* utilizado, o ABB RobotStudio, conclui-se que em diversos aspetos se apresenta na vanguarda desta tecnologia, não só em termos de simulação a três dimensões, mas também na facilidade com que o código desenvolvido e os sinais criados são descarregados para o controlador real.

7.1 Trabalho Futuro

Os objetivos do sistema proposto nesta dissertação foram cumpridos com sucesso. No entanto, nenhum sistema é perfeito, existindo sempre oportunidade para melhoria contínua. Relativamente ao desenvolvimento das trajetórias dos manipuladores robóticos, mais especificamente do robô extrator, existem certas deslocações que poderiam ser programadas através de *offsets*, tornando os ajustes de posições mais rápidos e simples de reprogramar. Referindo novamente o robô extrator, de forma a aumentar os processos automatizados nas células implementadas, poderão ser criadas diversas zonas de segurança, através do RobotStudio, ao longo de toda a trajetória deste manipulador robótico. Com isto, tornar-se-á quase inexistente a necessidade do operador ter de movimentar manualmente o robô até uma posição perto da inicial, para que não ocorra nenhuma colisão.

Relativamente ao robô lubrificador, devido ao ambiente onde este se encontra na sua trajetória (dentro da máquina injetora), desenvolveu-se uma solução que permitisse proteger a tubagem que transportava o ar e a água até ao atuador final. Apesar de não limitar significativamente a movimentação das juntas do robô, esta solução de proteção apresenta um peso extra no robô que, a longo prazo, pode vir a ter implicações negativas no desempenho do mesmo. Com isto, uma possível solução seria aplicar uma capa no robô, que resultaria não só numa redução do peso a que o manipulador robótico estaria sujeito, mas também reduziria a limitação na sua movimentação.

Com o desenvolvimento desta dissertação depreende-se que a robótica industrial deve prosseguir para um futuro onde a programação *offline* seja cada vez mais utilizada. Isto traz benefícios para todos os envolvidos nos projetos. Utilizando esta dissertação como exemplo, em que o cliente se encontrava a algumas horas de distância da empresa fornecedora, a alocação de recursos para viagens e possíveis estadias poderia ser evitada. Quanto mais trabalho se conseguir desenvolver *offline*, mais rapidamente os projetos serão concluídos e mais rentáveis serão economicamente.

Referências

- ABB. Detailed information for: 3hac028357-001. Disponível em <https://new.abb.com/products/3HAC028357-001/teach-pendant/>, Acedido: 12 de abril de 2019.
- ABB. Irc5 industrial robot controller. Disponível em <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0295EN&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, Acedido: 12 de fevereiro de 2019.
- ABB. Product specification - irb 2600. Disponível em <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC035959-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, Acedido: 29 de abril de 2019.
- ABB. Product specification - irb 4600. Disponível em <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC032885-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, Acedido: 29 de abril de 2019.
- ABB. Product specification - irb 6700. Disponível em <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC044265-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, Acedido: 29 de abril de 2019.
- ABB. Robotstudio - it's just like having the real robot on your pc! Disponível em <https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio/>, Acedido: 11 de abril de 2019.
- ABB (2007a). Ljunghäll ab. Disponível em <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK101130D7074&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, Acedido: 03 de abril de 2019.
- ABB (2007b). Vdt vobra/pomac. Disponível em <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK101130D7071&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, Acedido: 04 de abril de 2019.
- ABB (2008). Softmove. Disponível em <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK104295D0772&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, Acedido: 11 de maio de 2019.
- ABB (2010). Technical reference manual - rapid instructions, functions and data types. Disponível em https://library.e.abb.com/public/688894b98123f87bc1257cc50044e809/Technical%20reference%20manual_RAPID_3HAC16581-1_revJ_en.pdf, Acedido: 22 de maio de 2019.

- ABB (2012). Robotstudio - machine tending powerpac. Disponível em https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0239EN_R1&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch, Acessado: 11 de maio de 2019.
- ABB (2015a). At the touch of a button. Disponível em <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK10103A1768&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, Acessado: 04 de abril de 2019.
- ABB (2015b). An innovative die-casting line from artimpianti using abb robotics. Disponível em <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK10103A0965&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, Acessado: 29 de março de 2019.
- ABB (2018). Pilot devices - the complete offering. Disponível em <http://www.ourdoconline.com/lpcp/1SFC151007C02>, Acessado: 25 de fevereiro de 2019.
- A.K. Gupta, S.K. Arora, J. R. W. (2016). *Industrial Automation and Robotics: An Introduction*. Mercury Learning & Information.
- Andresen, W. (2004). *Die Cast Engineering: A Hydraulic, Thermal, and Mechanical Process*. CRC Press.
- Ang, M. H. (1991). Singularity coupling in robotic manipulators. *Fifth International Conference on Advanced Robotics 'Robots in Unstructured Environments*, pages 683–687.
- Boudette, N. E. (2018). Ford bet on aluminum trucks, but is still looking for payoff. Disponível em <https://www.nytimes.com/2018/03/01/business/ford-f150-aluminum-trucks.html>, Acessado: 27 de setembro de 2018.
- Brell-Çokcan, S. and Braumann, J. (2013). *Rob / Arch 2012: Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design*. Springer, 1 edition.
- CFS (2017). Aluminum die casting for automotive industry. Disponível em <http://www.investmentcastchina.com/aluminum-die-casting-for-automotive-industry/>, Acessado: 27 de setembro de 2018.
- F. A. Bravo, A. M. G. and González, E. (2017). A review of intuitive robot programming environments for educational purposes. *2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, pages 1–6.
- FANUC. New fanuc ipendant touch. Disponível em <https://www.fanuc.eu/ua/en/robots/accessories/robot-controller-and-connectivity/ipendant-touch/>, Acessado: 14 de abril de 2019.
- FANUC. R-1000ia/100f. Disponível em <https://www.fanuc.eu/pt/en/robots/robot-filter-page/r-1000-series/r-1000ia-100f/>, Acessado: 13 de fevereiro de 2019.

- Gantra (2016). Advantages and disadvantages of industrial robots. Disponível em <https://www.granta-automation.co.uk/news/advantages-and-disadvantages-of-industrial-robots/>, Acedido: 21 de janeiro de 2019.
- Ge, J. and Yin, X. (2007). An object oriented robot programming approach in robot served plastic injection molding application. In Tarn, T.-J., Chen, S.-B., and Zhou, C., editors, *Robotic Welding, Intelligence and Automation*, pages 91–97. Springer.
- Gibilisco, S. (2003). *Concise Encyclopedia of Robotics, First Edition*. McGraw-Hill.
- Groover, M. P. (2007). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. Prentice Hall Press.
- Heinemann, T. (2016). *Energy and Resource Efficiency in Aluminium Die Casting*. Springer.
- Hibbard, S., Lutz, P., Hussain, R., and Larsen, R. M. (2014). Sercos automation bus. In Zurawski, R., editor, *Industrial Communication Technology Handbook*. CRC Press.
- Hoffmann, J. (2017). Injury risk faced by foundry workers – st. louis work accident. Disponível em <https://www.hoffmannworkcomp.com/injury-risk-faced-by-foundry-workers-st-louis-work-accident/>, Acedido: 21 de janeiro de 2019.
- Hägele, M., Nilsson, K., Pires, J. N., and Bischoff, R. (2016). Industrial robotics. In Siciliano, B. and Khatib, O., editors, *Handbook of Robotics*, pages 1385–1458. Springer.
- IFR (2018a). Industrial robot sales increase worldwide by 31 percent. Disponível em <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/industrial-robot-sales-increase-worldwide-by-29-percent>, Acedido: 27 de setembro de 2018.
- IFR (2018b). Preview on world robotics 2018. Disponível em https://ifr.org/downloads/press2018/RT_WR_2018_Preview_20_06_rev.pdf, Acedido: 27 de setembro de 2018.
- Inaba, Y. and Sakakibara, S. (2009). Industrial intelligent robots. In Nof, S. Y., editor, *Handbook of Automation*, pages 349–363. Springer.
- Jazar, R. N. (2010). *Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control (2nd Edition)*. Springer.
- Jecht, U., Stripf, W., and Wenzel, P. (2014). Profibus. In Zurawski, R., editor, *Industrial Communication Technology Handbook*. CRC Press.
- Karabegović, I. (2017). The role of industrial robots in the development of automotive industry in china. *International Journal of Engineering Works*, pages 92–97.
- Kretschmar, M. and Welsby, S. (2005). Capacitive and inductive displacement sensors. In Wilson, J. S., editor, *Sensor Technology Handbook*, pages 193–197. Elsevier Ltd.
- KUKA. Kr 16 s - kuka robotics. Disponível em https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/pf0035_kr_16_s_en.pdf, Acedido: 23 de fevereiro de 2019.

- KUKA (2016). New die-casting cell for greater availability and performance. Disponível em <https://www.kuka.com/en-de/industries/solutions-database/2016/09/solution-industries-auto-heinen>, Acedido: 04 de abril de 2019.
- KUKA (2018). The kuka smartpad: simply more freedom. Disponível em <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/robot-controllers/smartpad/>, Acedido: 12 de abril de 2019.
- Laloni, C. and Wahl, F. M. (1995). Principles of robot simulation and their application in a pc-based robot simulation system. In Straßer, W. and Wahl, F. M., editors, *Graphics and Robotics*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Li, D. and Huang, Y. (2008). A general robot application platform for machine tending. *2008 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, pages 1–5.
- Lopes, A. M. (2001). Modelação cinemática e dinâmica de manipuladores de estrutura em série. Disponível em https://paginas.fe.up.pt/~aml/maic_files/cindin.pdf, Acedido: 12 de outubro de 2018.
- Low, K.-H. (2007). *Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications*. IntechOpen.
- NHTSA (2018). Corporate average fuel economy. Disponível em <https://www.nhtsa.gov/laws-regulations/corporate-average-fuel-economy>, Acedido: 27 de setembro de 2018.
- Omron (2019). Nx7 overview/features. Disponível em <http://www.ia.omron.com/products/family/3435/>, Acedido: 23 de fevereiro de 2019.
- Owen-Hill, A. (2015). Kinematics: Why robots move like they do. Disponível em <https://blog.robotiq.com/kinematics-why-robots-move-like-they-do/>, Acedido: 12 de fevereiro de 2019.
- Owen-Hill, A. (2016). Why singularities can ruin your day. Disponível em <https://blog.robotiq.com/why-singularities-can-ruin-your-day/>, Acedido: 12 de fevereiro de 2019.
- Pigan, R. and Metter, M. (2008). *Automating with PROFINET: Industrial Communication Based on Industrial Ethernet*. Publicis.
- Platzer, M., Feng, X., Wäppling, D., Baumli, N., Patel, R., Pons, R., Casanelles, R., and Weström, J. (2013). New robot concept for ultra high performance press tending robot system. *IEEE ISR 2013*, pages 1–3.
- Portelli, J. (2003). Agile assembly with robots. *Manufacturing Engineering Magazine*.
- Prytz, G., Juel, P. C., Hussain, R., and Skeie, T. (2014). Switched ethernet in automation. In Zurawski, R., editor, *Industrial Communication Technology Handbook*. CRC Press.
- Sauter, T. (2014). Fieldbus system fundamentals. In Zurawski, R., editor, *Industrial Communication Technology Handbook*. CRC Press.
- Scheinman, V., McCarthy, J. M., and Song, J.-B. (2016). Mechanism and actuation. In Siciliano, B. and Khatib, O., editors, *Handbook of Robotics*, pages 68–87. Springer.

- SCHUNK. Mpg - the most proven premium small components gripper in the world. Disponível em https://schunk.com/de_en/gripping-systems/series/mpg/, Acedido: 25 de fevereiro de 2019.
- Silva, M. (2012). *Segurança na Programação e Operação de Robôs Industriais*.
- Silva, M. (2016). *Noções Básicas de Robótica*.
- Silva, M. (2017). *Atuadores Finais para Robôs Industriais*.
- Vincent, J. (2017). Automation threatens 800 million jobs, but technology could still save us. Disponível em <https://www.theverge.com/2017/11/30/16719092/automation-robots-jobs-global-800-million-forecast>, Acedido: 25 de setembro de 2018.
- Waldron, K. J. and Schmiedeler, J. (2016). Kinematics. In Siciliano, B. and Khatib, O., editors, *Handbook of Robotics*, pages 12–33. Springer.
- Wenzel, P. (2014). Profinet. In Zurawski, R., editor, *Industrial Communication Technology Handbook*. CRC Press.
- Yong, Y. F. and Bonney, M. C. (1999). Off-line programming. In Nof, S. Y., editor, *Handbook of Industrial Robotics*, pages 353–371. Wiley.

Anexo A

Consolas de programação

As consolas de programação dos manipuladores robóticos variam de empresa para empresa. Vão ser apresentadas, de seguida, três consolas de diferentes empresas de robótica: KUKA, ABB e FANUC.

A.1 Consola de programação da KUKA

A consola de programação da KUKA, denominada smartPAD, ilustrada na Figura A.1, foi desenvolvida para lidar com tarefas complexas de maneira simples. A interface do smartPAD só apresenta as opções relevantes no momento em que a operação se encontra, tornando-se intuitiva, fazendo com que utilizadores menos experientes possam trabalhar com os mais experientes, ou seja, necessita-se de pouca formação, havendo um aumento da eficiência (KUKA, 2018).

O smartPAD pode ser retirado a qualquer altura do controlador do robô, sem necessidade de o desligar. Esta consola apresenta um modelo ergonómico, pesando 1.1 kg, tornando a sua utilização menos cansativa em operações demoradas.

O *joystick* desta consola contém seis dimensões, oferecendo uma movimentação intuitiva e a possibilidade de reorientar o manipulador robótico entre três e seis graus de liberdade. Esta consola possui oito teclas que permitem movimentar todas as juntas do robô sem necessidade de trocar as suas funções para esse efeito.

O smartPAD possui um *design* com proteção integrada, protegendo a consola de quedas, sendo que o ecrã também é resistente a riscos. Estas características tornam esta consola uma boa opção para ambientes com condições adversas, como a indústria da fundição. O smartPAD possui, também, um ícone que indica quando é necessária a substituição do seu cabo e um botão de paragem de emergência.



Figura A.1: Consola de programação da KUKA (KUKA, 2018).

Esta consola possui duas portas *Universal Serial Bus* (USB) que permitem gravar aplicações e carregar programas. O ecrã é tátil, com 126 mm de largura e 213 mm de comprimento. Com estas dimensões, torna mais acessível a escrita e interpretação de programas com extensas linhas de código (KUKA, 2018).

O controlador da KUKA, KR C4, fornece instruções padrão que podem ser chamadas através dos *menus* da consola, simplificando a programação para os operadores, existindo a possibilidade de se sincronizar até seis manipuladores robóticos. De acordo com as especificações de determinadas soluções, podem ser criadas instruções padrão adicionais, tornando a KUKA uma boa escolha para soluções únicas.

A.2 Consola de programação da ABB

A consola de programação da ABB, o FlexPendant, ilustrada na Figura A.2, possui um ecrã tátil e um *joystick* que permite movimentar e efetuar rotações do manipulador robótico nos eixos x , y e z . Esta consola tem uma interface simples e de fácil interpretação por parte do operador. Para além disso, o FlexPendant possui um processador independente do controlador do robô (Ge and Yin, 2007).

O FlexPendant permite ao programador efetuar saltos entre rotinas do programa, para efetuar testes. Possui também a hipótese de, com um único clique, alterar pontos da trajetória que tenham sido mal definidos. É possível definirem-se sinais digitais e analógicos, através da consola, de forma simples. O FlexPendant possui uma entrada USB que permite ao operador realizar cópias de segurança do controlador do manipulador robótico.

Esta consola possui um *design* ergonómico, pesando menos de 1.3 kg. Contém também oito teclas e um botão de paragem de emergência. A sua interface disponibiliza a informação em 12 linguagens diferentes, sendo que podem ser ativadas três em simultâneo, o que significa que podem ser alteradas durante a produção. Esta característica possibilita que operadores de diferentes nacionalidades possam trabalhar em simultâneo. O FlexPendant

pode ser rodado 180°, podendo ser utilizado por operadores destros ou esquerdinos. As opções fornecidas na consola podem ser alteradas de acordo com a utilização (Inaba and Sakakibara, 2009).



Figura A.2: Consola de programação da ABB (ABB, a).

A ABB possui um *software* designado por ScreenMaker que permite aos utilizadores desenvolverem interfaces gráficas personalizadas para o FlexPendant.

Apesar das vantagens referidas, quando o código do programa do manipulador robótico se torna extenso, o ecrã da consola demonstra ser pequeno, podendo tornar a sua utilização difícil para operadores sem experiência.

A.3 Consola de programação da FANUC

A consola de programação da FANUC, o iPendant, ilustrada na Figura A.3, possui uma interface simples, um ecrã tátil e teclas que permitem controlar as juntas do manipulador robótico. Podem existir duas janelas em simultâneo no ecrã, possibilitando ao operador realizar diversas tarefas ao mesmo tempo. Fornece, também, gráficos a três dimensões, facilitando a programação do robô (FANUC, a).

Esta consola fornece a possibilidade de o utilizador criar os seus próprios ecrãs em *HyperText Markup Language* (HTML) com a sua funcionalidade de customização. O iPendant possui diversas funções que facilitam a sua utilização (FANUC, a): editor gráfico; teclas de acesso direto a dois eixos adicionais; ecrã capaz de fornecer duas janelas; alterações e modificações do *software* de deteção visual da FANUC através da consola; porta USB para inserir dispositivos de armazenamento de dados ou ratos.



Figura A.3: Consola de programação da FANUC (FANUC, a).

O iPendant permite configurar as ferramentas, zonas de segurança e as trajetórias do manipulador robótico em quatro dimensões. A forma como estão representadas as trajetórias foi desenvolvida de maneira a facilitar a sua compreensão. Utilizando o modelo a três dimensões do robô, na consola, existe a possibilidade de se verificar a direção e distância dos movimentos que o manipulador está a efetuar (FANUC, a).

Anexo B

Características de desempenho dos robôs

Tabela B.1: Características de desempenho dos robôs ([ABB, d,e,c](#)).

	IRB 6700	IRB 4600	IRB 2600
Alcance	3.05 m	2.05 m	1.65 m
Capacidade de carga	175 kg	45 kg	20 kg
Repetibilidade da posição	0.05 mm	0.05 mm	0.04 mm
Repetibilidade da trajetória	0.12 mm	0.13 mm	0.13 mm
Exatidão da posição	0.04 mm	0.02 mm	0.03 mm
Exatidão da trajetória	1.9 mm	0.48 mm	0.55 mm
Temperatura durante operação	Máximo 50 °C	Máximo 45 °C	Máximo 45 °C

Anexo C

Targets definidos na trajetória desenvolvida para o molde centrado da Célula C

C.1 Posição inicial - Máquina injetora

Tabela C.1: *Targets* definidos da posição inicial à máquina injetora.

Nome do <i>target</i>	Movimento	Velocidade	Zona	Configuração
c_Home_Target_10	MoveJ	vAuto	z100	1 -1 0 0
c_ExtrPeca_Inj_Target_10	MoveJ	vAuto	z100	0 -1 0 1
c_ExtrPeca_Inj_Target_20	MoveJ	vAuto	z100	1 0 -1 1
c_ExtrPeca_Inj_Target_30	MoveL	vAuto	z0	1 0 -1 1
c_ExtrPeca_Inj_Target_40	MoveL	vJito	fine	0 -1 0 1

C.2 Máquina injetora - Matriz de sensores

Tabela C.2: *Targets* definidos da máquina injetora à matriz de sensores.

Nome do <i>target</i>	Movimento	Velocidade	Zona	Configuração
c_Afericao_Target_10	MoveJ	vAuto	fine/z100	0 0 0 1
c_Afericao_Target_20	MoveL	vAfericao	fine	0 0 0 1
c_Afericao_Target_30	MoveJ	vAuto	z100	-1 0 1 1

C.3 Matriz de sensores - Tina de água

Tabela C.3: *Targets* definidos da matriz de sensores à tina de água.

Nome do <i>target</i>	Movimento	Velocidade	Zona	Configuração
c_Arrefecimento_Target_10	MoveJ	vAuto	z100	-1 0 0 1
c_Arrefecimento_Target_20	MoveJ	vArrefece	z100	-1 0 0 1
c_Arrefecimento_Target_30	MoveJ	vArrefece	z100	-1 -1 1 1
c_ArrefecimentoOsc_Target_40	MoveJ	vArrefece	z100	-1 -1 1 1
c_ArrefecimentoOsc_Target_50	MoveJ	vArrefece	z100	0 0 0 1
c_Arrefecimento_Target_60	MoveJ	vArrefece	z100	0 0 -1 1

C.4 Tina de água - Prensa - Posição inicial

Tabela C.4: *Targets* definidos da tina de água à prensa.

Nome do <i>target</i>	Movimento	Velocidade	Zona	Configuração
c_Prensa_Target_10	MoveJ	vAuto	z100	-1 0 0 1
c_Prensa_Target_20	MoveJ	vAuto	z100	-1 0 0 1
c_Prensa_Target_30	MoveL	vAuto	z0	-1 0 0 1
c_Prensa_Target_40	MoveL	vPrensa	fine	-1 0 0 1
c_Home_Target_10	MoveJ	vAuto	z100	1 -1 0 0

C.5 Tina de água - Rampa de inspeção - Posição inicial

Tabela C.5: *Targets* definidos da tina de água à rampa de inspeção.

Nome do <i>target</i>	Movimento	Velocidade	Zona	Configuração
c_RampaInsp_Target_10	MoveJ	vAuto	z100	-1 -1 1 0
c_RampaInsp_Target_20	MoveJ	vAuto	z100	-2 -2 2 0
c_RampaInsp_Target_30	MoveJ	vAuto	z100	-2 -2 2 0
c_RampaInsp_Target_40	MoveL	vRampas	fine	-2 -2 2 0
c_RampaInsp_Target_50	MoveL	vRampas	z0	-2 -2 2 0
c_Home_Target_10	MoveJ	vAuto	z100	1 -1 0 0

C.6 Tina de água - Rampa NOK - Posição inicial

Tabela C.6: *Targets* definidos da tina de água à rampa NOK.

Nome do <i>target</i>	Movi- mento	Velocidade	Zona	Configura- ção
c_RampaNOK_Target_10	MoveJ	vAuto	z100	-1 -1 1 0
c_RampaNOK_Target_20	MoveJ	vAuto	z100	-2 1 -1 0
c_RampaNOK_Target_30	MoveL	vAuto	z100	-2 1 -1 0
c_RampaNOK_Target_40	MoveL	vRampas	fine	-2 1 0 0
c_RampaNOK_Target_50	MoveL	vRampas	z0	-2 1 0 0
c_RampaNOK_Target_60	MoveJ	vAuto	z100	-2 0 0 0
c_Home_Target_10	MoveJ	vAuto	z100	1 -1 0 0

C.7 Robô lubrificador

Tabela C.7: *Targets* definidos para lubrificação.

Nome do <i>target</i>	Movi- mento	Velocidade	Zona	Configura- ção
c_LubHome_Target_00	MoveJ	vAuto	z100	0 0 1 0
c_LubPreStart_Target_00	MoveJ	vAuto	z100	-1 0 1 0
c_Lub_Target_10	MoveJ	vAuto	z100	-1 0 0 0
c_Lub_Target_20	MoveJ	vAuto	z100	-1 0 0 0
c_Lub_Target_30	MoveJ	vAuto	z100	-1 0 0 0
c_Lub_Target_40	MoveJ	vAuto	z100	-1 0 0 0
c_Lub_Target_50	MoveJ	vAuto	z100	-1 0 1 0
c_Lub_Target_60	MoveJ	vAuto	z100	-1 0 1 0
c_Lub_Target_70	MoveJ	vAuto	z100	-1 0 0 0
c_Lub_Target_80	MoveJ	vAuto	z100	-1 0 1 0
c_Lub_Target_90	MoveJ	vAuto	z100	-2 -1 0 0
c_Lub_Target_100	MoveJ	vAuto	z100	-2 -1 1 0
c_Lub_Target_110	MoveJ	vAuto	z100	-2 -1 1 0
c_Lub_Target_120	MoveJ	vAuto	z100	-2 -1 1 0

Anexo D

Sinais digitais

D.1 Sinais de entrada digitais enviados pela máquina injetora para R1

Tabela D.1: Sinais de entrada da máquina injetora para R1.

Nome do sinal	Descrição	Comunicação
di_R1_Req	Máquina requer robô R1	PROFINET
di_Mac_Auto	Máquina injetora em automático	PROFINET
di_Mac_Open	Porta e molde da máquina abertos	PROFINET
di_R1_Start	R1 inicia ciclo	PROFINET
di_Extract_Front	Extratores para a frente	PROFINET
di_Piece_Nok	Ciclo de peça NOK	PROFINET
di_Piece_Qual	Ciclo de peça de inspeção	PROFINET
di_Abort_Cycle	Ciclo abortado	PROFINET
di_Press_Auto	Prensa em automático	PROFINET
di_Press_Alarm	Prensa em alarme	PROFINET
di_Press_Ready	Prensa pronta para a peça	PROFINET
di_Check_Piece_Press	Prensa sem peça presente	PROFINET
di_Press_OpDoor_Closed	Porta do lado do operador fechada	PROFINET
di_Press_RobDoor_Open	Porta do lado do robô aberta	PROFINET

D.2 Sinais de saída digitais enviados por R1 para a máquina injetora

Tabela D.2: Sinais de saída de R1 para a máquina injetora.

Nome do sinal	Descrição	Comunicação
do_R1_Cmd_Extract	Comando para os extratores	PROFINET
do_R1_Out_Mac	R1 encontra-se fora da máquina	PROFINET
do_Piece_Nok	A peça encontra-se NOK	PROFINET
do_Close_Mold	Consentimento de fecho do molde	PROFINET
do_Close_Door	Fechar a porta da máquina	PROFINET
do_R1_Home	R1 encontra-se na posição <i>home</i>	PROFINET
do_R1_Alarm	R1 em alarme	PROFINET
do_Start_Cycle	Início de ciclo	PROFINET
do_R1_Out_Press	Robô fora da prensa	PROFINET

D.3 Sinais de entrada digitais de R1

Tabela D.3: Sinais de entrada de R1.

Nome do sinal	Descrição	Comunicação
di_Start_System	Botão verde que liga o robô e inicia o programa	ETHERNET
di_PP_Main	Botão vermelho que coloca o ponteiro do programa na primeira instrução	ETHERNET
di_Reset_Emg	Botão laranja que faz <i>reset</i> às emergências	ETHERNET
di_R2_Out	R2 fora da máquina injetora	ETHERNET
di_R1_Air_Ok	Pressão de ar OK na garra de R1	ETHERNET
di_Sensor_POS[1...8]	Oito sensores de detecção da peça	ETHERNET

D.4 Sinais de saída digitais de R1

Tabela D.4: Sinais de saída de R1.

Nome do sinal	Descrição	Comunicação
do_R1_Out	R1 fora da máquina injetora	ETHERNET
do_Gripper_R1	Abertura e fecho da garra de R1	ETHERNET

D.5 Sinais de entrada digitais enviados pela máquina injetora para R2

Tabela D.5: Sinais de entrada da máquina injetora para R2.

Nome do sinal	Descrição	Comunicação
di_Mac_Auto	Máquina injetora em automático	PROFINET
di_Mold_Open	Pratos da máquina injetora abertos	PROFINET
di_R2_Start	Arranque de ciclo de R2	PROFINET
di_R2_PreStart	R2 em posição antes de iniciar o ciclo	PROFINET
di_R2_Inserted	R2 requerido	PROFINET

D.6 Sinais de saída digitais enviados por R2 para a máquina injetora

Tabela D.6: Sinais de saída enviados de R2 para a máquina injetora.

Nome do sinal	Descrição	Comunicação
do_R2_Out	R2 fora da máquina injetora	PROFINET
do_R2_End_Cycle	Fim de lubrificação	PROFINET
do_R2_PreStart	R2 em posição antes de iniciar o ciclo	PROFINET
do_R2_Home	R2 na posição de <i>home</i>	PROFINET
do_Return_Piston	Retorno do pistão da máquina	PROFINET
do_R2_Alarm	R2 em alarme	PROFINET

D.7 Sinais de entrada digitais de R2

Tabela D.7: Sinais de entrada de R2.

Nome do sinal	Descrição	Comunicação
di_R1_Out	R1 fora da máquina injetora (enviado por R1)	ETHERNET
di_Start_System	Botão verde que liga o robô e inicia o programa	ETHERNET
di_PP_Main	Botão vermelho que coloca o ponteiro do programa na primeira instrução	ETHERNET
di_Reset_Emg	Botão laranja que faz <i>reset</i> às emergências	ETHERNET
di_Press_AirPilot_Ok	Sensor da válvula de pilotagem	ETHERNET
di_Press_AirBlow_Ok	Sensor da válvula de ar	ETHERNET
di_Press_AirAtm_Ok	Sensor da válvula de atomização	ETHERNET

D.8 Sinais de saída digitais de R2

Tabela D.8: Sinais de saída de R2.

Nome do sinal	Descrição	Comunicação
do_R2_Out_Mac	R2 fora da máquina injetora	ETHERNET
do_Ev1_Blow	Eletroválvula de sopro lado fixo	ETHERNET
do_Ev2_Blow	Eletroválvula de sopro lado móvel	ETHERNET
do_Ev3_Atm	Eletroválvula de ar para lubrificação lado fixo	ETHERNET
do_Ev4_Atm	Eletroválvula de ar para lubrificação lado móvel	ETHERNET
do_Ev5_Lub	Eletroválvula de água para lubrificação	ETHERNET
do_Ev[6...21]_B[1...16]	Eletroválvulas para cada bico do <i>gripper</i>	ETHERNET